



PATENT APPLICATION

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

In re application of

Docket No: Q79584

Osamu IWASAKI, et al.

Appln. No.: 10/765,281

Group Art Unit: 1731

Confirmation No.: 7585

Examiner: Unknown

Filed: January 28, 2004

For: SHEET-TYPE OPTICAL CONDUCTOR AND COMMUNICATION SYSTEM USING
THE SHEET-TYPE OPTICAL CONDUCTOR

SUBMISSION OF PRIORITY DOCUMENT

Commissioner for Patents
P.O. Box 1450
Alexandria, VA 22313-1450

Sir:

Submitted herewith is a certified copy of the priority document on which a claim to priority was made under 35 U.S.C. § 119. The Examiner is respectfully requested to acknowledge receipt of said priority document.

Respectfully submitted,

Darryl Mexic Reg# 38,557
G/ Darryl Mexic
Registration No. 23,063

SUGHRUE MION, PLLC
Telephone: (202) 293-7060
Facsimile: (202) 293-7860

WASHINGTON OFFICE
23373
CUSTOMER NUMBER

Enclosures: JAPAN 2003-018597

Date: August 16, 2004

日本国特許庁
JAPAN PATENT OFFICE

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日 2003年 1月28日
Date of Application:

出願番号 特願2003-018597
Application Number:

[ST. 10/C] : [JP2003-018597]

出願人 富士写真フィルム株式会社
Applicant(s):

CERTIFIED COPY OF
PRIORITY DOCUMENT

2003年10月 6日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

今井康夫

【書類名】 特許願
【整理番号】 P27396J
【あて先】 特許庁長官殿
【国際特許分類】 G02B 6/28
【発明者】

【住所又は居所】 神奈川県足柄上郡開成町宮台 798 番地 富士写真フィルム株式会社内

【氏名】 岩崎 修

【発明者】

【住所又は居所】 静岡県富士宮市大中里 200 富士写真フィルム株式会社内

【氏名】 原 宏

【特許出願人】

【識別番号】 000005201

【氏名又は名称】 富士写真フィルム株式会社

【代理人】

【識別番号】 100073184

【弁理士】

【氏名又は名称】 柳田 征史

【選任した代理人】

【識別番号】 100090468

【弁理士】

【氏名又は名称】 佐久間 剛

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 008969

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9814441

【プルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 シート状導光体を用いた通信システム

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 シート状の光学媒質内に光を散乱させる粒子を含有してなり、一端面から入射した信号光を前記粒子により散乱させながら、受光器が結合された他端面側に伝搬させるシート状導光体を用いた通信システムにおいて、

前記粒子の散乱断面積を Φ 、前記光学媒質の光伝搬方向の長さを L_G 、粒子密度を N_p 、補正係数を K_C としたとき、 $\Phi \cdot N_p \cdot L_G \cdot K_C$ の値が0.9以下となっていることを特徴とするシート状導光体を用いた通信システム。

【請求項 2】 システムの rms ノイズを Noise (System_rms) 、許容されるビットエラーレートを BER(accept)、Noise (System_rms) の発生確率を P_r (Noise (System_rms)) としたとき、Qを比例定数として、

$$P_r (Noise (System_rms) \cdot Q) \leq BER (accept)$$

を満足していることを特徴とする請求項 1 記載のシート状導光体を用いた通信システム。

【請求項 3】 シート状導光体の内部透過率等を総合した損失係数を K_L として、該シート状導光体における光の取り出し効率 E_{out} を、

$$E_{out} = e \times p \{ - (\Phi \cdot N_p \cdot L_G \cdot K_C) \} \cdot K_L$$

とし、

入射光量を P_{in} 、最小光量となるセグメントの光量を $N_{Pi}(\min)$ 、各セグメントの光量和を $\sum N_{Pi}$ 、発光器、光ファイバおよび受光器等の結合損失を K_T として受光器の最小受光光量 $P_{(Receiver_min)} dBm$ を、

$$P_{(Receiver_min)} dBm = -10 \log \{ P_{in} \cdot E_{out} \cdot (N_{Pi}(\min) / \sum N_{Pi}) \cdot \pi / 4 \} \cdot K_T$$

とし、

上記最小受光光量 $P_{(Receiver_min)} dBm$ および受光器の負荷抵抗から決まる信号電圧を $S(P_{Rmin})v$ 、システムの rms ノイズを Noise (System_rms) 、2 値化における任意の閾値を $V(Thresh)$ としたとき、

$$\{S(P_{Rmin})v - V(Thresh)\} > Noise (System_rms) \cdot Q$$

を満足していることを特徴とする請求項 1 または 2 記載のシート状導光体を用いた通信システム。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は導光体、特に詳細には、シート状の光学媒質内に光を散乱させる粒子を含有してなり、一端面から入射した光を前記粒子により散乱させながら他端面側に伝搬させるシート状導光体を用いた通信システムに関するものである。

【0002】

【従来の技術】

従来、例えば特許文献 1 や特許文献 2 に示されているように、PMMA（ポリメチルメタクリレート）等の光学媒質内に光を散乱させる粒子を含有してなり、一端面から入射した光を前記粒子により散乱させながら別の端面側に伝搬させる導光体が公知となっている。

【0003】

このような導光体は、その側端面と周囲媒質（空気あるいはクラッド層）との界面における全反射の作用に加えて、光学媒質内の粒子で散乱を繰り返させながら光を伝搬させるものであるので、全反射の作用のみで光を伝搬させる導光体と比較すると、より強度が均一化した光を出射端面から取り出せるという利点を有している。その利点を活かしてこの種の導光体は、例えば特許文献 3 に示されるように、シート状の光学媒質を用いて形成し、その一端面に光信号を入力する 1 つの入力部を結合するとともに他端面に複数の出力部を結合して、入力された光信号を複数の出力部に共通の信号として分配する光データバス（シートバス）を構成するために適用することが考えられている。

【0004】

また、このような光データバスとして、例えば特許文献 4 に示されるように、シート状光学媒質の光入射側の端部に各信号光入射部に対応させて光拡散部を設け、この光拡散部で拡散、分岐した信号光を該光学媒質の光出射側の端部に向けて伝搬させるようにしたものも公知となっている。

【0005】**【特許文献1】**

特許第3162398号公報

【0006】**【特許文献2】**

特許第3184219号公報

【0007】**【特許文献3】**

特開平10-123350号公報

【0008】**【特許文献4】**

特開平11-31035号公報

【0009】**【発明が解決しようとする課題】**

特許文献4に示されるような光データバスにおいては、光拡散部を一辺が $100\mu\text{m}$ からなる多数の単位光学素子から構成する必要があり、作製が極めて困難であるという問題が認められている。また、このような光拡散部をシート状光学媒質の一方の端部に形成すれば、その端部側において光検出することは事実上不可能であってその端部は光入射側と限定せざるを得ず、よってこのシート状光学媒質を介して双方向通信することは不可能となる。

【0010】

特許文献3に示されるようなシート状導光体を用いれば、双方向通信することも可能である。しかし従来、この種のシート状導光体において、所望の光取り出し効率や、均一な出射光強度分布を実現する設計条件を簡単に求めることは不可能であった。そこで従来は、所望の特性の導光体を得る上で、光学媒質内に含有させる粒子の粒子径や粒子密度を変えて複数の導光体サンプルを作製し、それらの中から所望の光取り出し効率や均一な出射光強度分布が得られる導光体を選んで使用する手法や、計算機を用いた大がかりなシミュレーションによって設計条件を求める手法が採用されていた。

【0011】

本発明は上記の事情に鑑みて、シート状導光体において良好な光取り出し効率および、均一な出射光強度分布が得られ、また双方向通信も可能である、シート状導光体を用いた通信システムを提供することを目的とする。

【0012】**【課題を解決するための手段】**

本発明によるシート状導光体を用いた通信システムは、

前述したようにシート状の光学媒質内に光を散乱させる粒子を含有してなり、一端面から入射した信号光を前記粒子により散乱させながら、受光器が結合された他端面側に伝搬させるシート状導光体を用いた通信システムにおいて、

前記粒子の散乱断面積を Φ 、前記光学媒質の光伝搬方向の長さを L_G 、粒子密度を N_p 、補正係数を K_C としたとき、 $\Phi \cdot N_p \cdot L_G \cdot K_C$ の値が0.9以下となっていることを特徴とするものである。

【0013】

なお、本発明によるシート状導光体を用いた通信システムにおいては、システムのrms (root mean square) ノイズをNoise (System_rms)、許容されるビットエラーレートをBER(accept)、Noise (System_rms) の発生確率をP_r (Noise (System rms))としたとき、Qを比例定数として、

$$\underline{P_r (Noise (System rms))} \cdot Q = BER(accept)$$

を満足していることが望ましい。

【0014】

さらに、本発明によるシート状導光体を用いた通信システムにおいては、システムのrms ノイズをNoise (System_rms)、2値化における任意の閾値をV(Thresh)、受光器から負荷抵抗を介して出力する信号電圧をS(PRmin)vとしたとき、Qを比例定数として、

$$\{S(PRmin)v - V(Thresh)\} > Noise (System_rms) \cdot Q$$

を満足していることが望ましい。

【0015】

また、本発明で用いる上記シート状導光体は、入射光が入・出射端面以外の各

面においてSnell's Lawに従って反射を繰り返すものとし、周囲媒質の屈折率をN_s、母材の光学媒質の屈折率をN_m、入射角をθ_m、屈折角をθ_sとしたとき、粒子を含有しない場合にN_m · sin θ_m = N_s · sin θ_sであるならば、sin θ_s > 1 を満足する形状の光学媒質から構成されることが望ましい。

【0016】

また上記シート状導光体は、少なくとも1つの出射端面から出射する光線が該出射端面での反射・屈折においてSnell's Lawに従うものとし、周囲媒質の屈折率をN_s、母材となる光学媒質の屈折率をN_m、入射角をθ_m、屈折角をθ_sとしたとき、粒子を含有しない場合にN_m · sin θ_m = N_s · sin θ_sであるならば、sin θ_s < 1 を満足する形状の光学媒質から構成されることが望ましい。

【0017】

また本発明で用いるシート状導光体においては、光学媒質に混入する粒子がMie散乱理論に従う非磁性の伝導体粒子であってもよい。また光学媒質において、粒子は粒子密度に勾配を持たせて混入されてもよい。

【0018】

さらにこのシート状導光体は、複数の光学媒質を組み合わせて構成することも可能である。

【0019】

【発明の効果】

前述の特許文献1および2には、屈折率不均一構造により、あるいは誘電体粒子を光学媒質に混入・拡散させ、所望の光強度分布を実現するための導光路が提案されている。またこれらの特許文献1および2には、Debyeの濁度(Turbidity)理論(Journal of Applied Physics Vol.20 pp.518~525 (1949))を応用することにより、散乱光強度を高め、かつ出射口における光強度分布の均一化を実現できることが記されている。Debyeは、Einsteinの“気体または液体中の誘電率の熱的揺らぎについての理論”(Annalen Der Physik 33 pp. 1275~1298 (1910))

の中で、特に散乱光に関する考察を引用しており、上記論文中的Einsteinの式は

下の通りである。

【0020】

$$i/I_0 = (RT/N) \cdot [(\epsilon - 1)^2 (\epsilon + 2)^2 / P] \cdot (2\pi/\lambda)^4 \\ [V/(4\pi D)^2] \cos^2 \theta \dots \dots (1)$$

ここで、 i : 散乱体から距離D離れた位置での光強度

I_0 : 入射光の強度

R : 気体定数

T : 絶対温度

N : 1グラム分子中の分子数

ϵ : 波長 λ に対する屈折率の二乗 (誘電率)

P : 流体に加わる圧力

λ : 波長

V : 光散乱体の体積

D : 光散乱体と観測点までの距離

θ : 散乱角

上記Einsteinの式はDebyeにより変形され、下式で表されている。

【0021】

$$i/I = <\eta>^2 / \epsilon^2 (\pi^2 V/\lambda^4 R^2) \cdot (1 + \cos^2 \theta) / 2 \cdot \omega \\ \dots \dots (2)$$

ここで、 i : 散乱体から距離D離れた位置での光強度

I_0 : 入射光の強度

ϵ : 散乱体の誘電率

$<\eta>^2$: 散乱体の誘電率の揺らぎの二乗平均値

R : 観測点と散乱体までの距離

λ : 波長

V : 光散乱体の全体積

θ : 散乱角

ω : 相関体積

また、 $\omega = 4\pi \int \sin(k_s r) / k_s r \cdot r^2 \gamma(r) dr \dots \dots (3)$

k : 波数

s : 入射光の単位ベクトルと出射光の単位ベクトルの合成ベクトルの長さ

r : 誘電率揺らぎを生じている 2 点間の距離

$s = 2 \sin(\theta/2)$ である。

【0022】

Debyeによれば、相関体積 ω は相関関数 $\gamma(r)$ を

$$\gamma(r) = e^{-r/a} \quad (a : \text{相関距離})$$

とおくと積分でき、故に (3) 式は、

$$\omega = 8\pi a^3 / (1 + k^2 s^2 a^2)^2 \quad \dots \quad (4)$$

で表される。

【0023】

(2)、(4) 式より、

$$\frac{i}{I} = <\eta>^2 / \epsilon^2 (\pi^2 V / \lambda^4 R^2) \cdot (1 + \cos^2 \theta) / 2 \cdot 8 \pi a^3 / (1 + k^2 s^2 a^2)^2$$

ここで、 $s = 2 \sin(\theta/2)$ を用いて (2) 式は、

$$\frac{i}{I} = 4\pi a^3 <\eta>^2 / \epsilon^2 (\pi^2 V / \lambda^4 R^2) \cdot (1 + \cos^2 \theta) / (1 + 8\pi^2 (1 - \cos \theta) (a/\lambda)^2)^2 \quad \dots \quad (5)$$

となる。(4) 式の散乱角強度の項は、以下で示される。

【0024】

$$\begin{aligned} f(\theta) &= (1 + \cos^2 \theta) / (1 + 8\pi^2 (1 - \cos \theta) (a/\lambda)^2)^2 \\ &\dots \quad (6) \end{aligned}$$

この (6) 式を代表的な (a/λ) の値毎に計算して、散乱角規格化強度を求めた結果を図 1 に示す。また、Mie 散乱理論に基づいて、代表的な粒子径 D_p の値毎に散乱角規格化強度を求めた結果を図 2 に示す。

【0025】

特許文献 1 および 2 によれば、粒子径はほぼ相関距離に等しいと考えることができるので、図 1 より、粒子径が波長と同程度の大きさであれば前方散乱光の強度が強くなるが、粒子径が波長の 10 倍を超えると側方散乱光の強度が極めて強

くなり、もはや前方には光が進行しないことが分かる。一方、Mie散乱理論によれば、図2から明らかなように、粒子径が波長の10倍を超えて前方散乱光の強度はなお強い。Debyeの濁度理論は、 $\gamma(r) = e \times p(-r/a)$ で近似した場合、粒子径が波長と同程度の場合は、Mie散乱の結果に近いが、それよりも大きい粒子径に対しては、Mie散乱理論と大きくずれを生じていることが分かる。

【0026】

以上の考察から、所望の光学媒質に光散乱を生じさせる粒子を混入し、入射した光を均一な強度分布として出射させるために用いる計算手法として、粒子の大きさが波長よりも非常に小さい場合にはRayleigh散乱を表し、非常に大きい場合はHoygens-Fresnel回折を表す、Mie散乱理論がより適切であると考えられる。さらに、Mie散乱理論は1粒子系であり、多粒子の散乱に対しては、Mie散乱理論に基づいた多粒子系での解析が必要であると考えられる。

【0027】

本発明で用いるシート状導光体を製造するに当たっては、以上の考察に基づいて、所望の光取り出し効率を実現する設計条件を簡単に求めることができる。以下、この方法を詳しく説明する。

【0028】

<散乱断面積>

まず、散乱断面積 Φ について説明する。Mie散乱理論に限らず、また可視域の光以外に、 γ 線やX線等の放射線領域や赤外線やマイクロ波等の長波長領域において、散乱断面積という概念が広く用いられている。粒子径と波長の関係がRayleigh領域にある場合、散乱断面積 Φ は、

$$\Phi = 128 \cdot \pi^5 \cdot (a_p^6 / 3\lambda^4) \cdot \{ (n^2 - 1) / (n^2 + 2) \}^2 \dots (7)$$

ただし a_p : 粒子半径

λ : 入射光の波長

n : 相対屈折率

で表される。

【0029】

一方、Mieの理論において、散乱断面積 Φ は下の（8）式で表される。

【0030】

【数1】

$$\Phi = (\lambda^2 / 2\pi) \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \cdot [|a_n|^2 + |b_n|^2] \quad (8)$$

λ ：入射光の波長

$$a_n = \frac{\phi n(\alpha) \cdot \phi' n(\beta) - N \cdot \phi n(\beta) \cdot \phi' n(\alpha)}{\xi n(\alpha) \cdot \phi' n(\beta) - N \cdot \phi n(\beta) \cdot \xi' n(\alpha)}$$

$$b_n = \frac{N \cdot \phi n(\alpha) \cdot \phi' n(\beta) - \phi n(\beta) \cdot \phi' n(\alpha)}{N \cdot \xi n(\alpha) \cdot \phi' n(\beta) - \phi n(\beta) \cdot \xi' n(\alpha)}$$

$$\phi n(kr) = (\pi kr / 2) \cdot J_{n+1/2}(kr)$$

$J_{n+1/2}(kr)$: 第1種Bessel関数

k : 波数 ($2\pi/\lambda$)

r : 極座標における距離成分

$\phi' n$: ϕn の導関数

$$\xi n(kr) = \phi n(kr) + i \cdot \chi n(kr)$$

$$\chi n(kr) = -(\pi kr / 2) \cdot N_{n+1/2}(kr)$$

$N_{n+1/2}(kr)$: Neumannの第2種Bessel関数

$\xi' n$: ξn の導関数

$$\alpha = 2\pi a / \lambda$$

$$\beta = N \cdot \alpha$$

上記（8）式の $a / \lambda \gg 1$ の極限では、散乱断面積 Φ は、

$$\Phi = M \pi a_p^2 \quad (\text{収束時: } M \approx 2) \dots \quad (9)$$

である。そして（8）式より、 $2\pi a_p / \lambda \approx 1$ の領域では、上記Mが $1 < M < 6$ の間で振動することが分かっている。

【0031】

ここで図3 a、bおよびcにそれぞれ、相対屈折率nが1.1、1.5、2.1である場合のMの振動の様子を示す。これらの図より、Mie散乱領域における散乱断面積 Φ は、粒子径 D_p の増大により振動・収束して行くことが分かる。この振動領域においても、相対屈折率nが1から2程度の広い範囲で、Mie散乱領域の収束する幾何学的散乱断面積 πa_p^2 に乘ずる数値を、図3 a～cにより各粒子径に

応じて求めることが可能である。

【0032】

上述の(7)、(9)式に基づいて粒子径 D_p と散乱断面積 Φ との関係を、いくつかの相対屈折率 n 毎に求めた結果を図4に示す。一方、Mie散乱理論に基づいて、多粒子系の粒子径 D_p と、ある数値を乗じた粒子密度の逆数との関係を計算機シミュレーションで求めた結果を図5に示す。

【0033】

なお、これらの計算機シミュレーションでは、ある有限の拡がり角をもつ光を、内部に粒子を含有する10mm角から1000mm角の各種の大きさの立方体形状を持つ光学媒質に入射させたものとしている。すなわち、入射光と立方体の大きさは相似的に変化する。また粒子径 D_p はRayleigh散乱領域からFresnel回折領域に至るまでの幅広い範囲で変化させた。またこれらの計算機シミュレーションでは、光は入射側と対向する位置から入射光と同方向に出射するものとし、そして立方体の光の出射端における光の取り出し効率は約80%としている。

【0034】

これらの図4および5より、散乱断面積と、有限の大きさの光学媒質中の粒子数との間に密接な関係が有ることが分かる。

【0035】

<Lambert-Beer則と散乱断面積>

平行光束を等方媒質に入射させた場合の透過率 T は、Lambert-Beer則により

$$T = I / I_0 = e^{-\rho \cdot x} \quad \dots \quad (10)$$

ここで x : 距離

I_0 : 入射光強度

I : 出射光強度

ρ : 減衰定数

で表される。

【0036】

上記減衰定数 ρ は、粒子の散乱断面積を Φ 、媒質に含まれる単位体積当たりの粒子数を N_p とすると

$$\rho = \Phi \cdot N_p \cdot K_C \quad \dots \quad (11)$$

であると考えられる。ここで、 K_C は有限の空間の光学媒質中で光が伝搬する場合に経験的に求められる無次元の補正係数である。

【0037】

そして、導光体を設計する上で一般に必要とされるパラメータは、光学媒質の体積 V 、混入粒子数 N_{PT} および粒子径 D_p であり、その場合に出射光強度がどのように変化するか検討する。

【0038】

ここで、 $N_p = N_{PT} / V$ である。さらに、図4と図5との比較・類推並びに図示しないいくつかのデータから K_C は決定される。本計算においては、図4、図5並びに図示しないいくつかのデータから $K_C = 0.004$ が得られた。粒子径 D_p と散乱断面積 Φ は、(7)、(9)式より対応付けられ、故に、光学媒質の光軸方向への長さを L_G とすると、光の取り出し効率 E_{out} は、

$$E_{out} = \exp \{ - (\Phi \cdot N_p \cdot L_G \cdot K_C) \} \quad \dots \quad (13)$$

で与えられる。この(13)式より、 $\Phi \cdot N_p \cdot L_G = \text{CONST.}$ とすれば取り出し効率を一定にできることが分かる。つまり、光学媒質の光軸方向への長さ L_G に応じて N_p を変化させればよい。

【0039】

さらに、粒子が存在しない場合に、立体の形状、入射光の強度分布、入射角度に依存するFresnel損失と、内部透過率等を総合した損失係数 K_L で表せば、上記(13)式は、

$$E_{out} = \exp \{ - (\Phi \cdot N_p \cdot L_G \cdot K_C) \} \cdot K_L \quad \dots \quad (14)$$

となる。

【0040】

すなわち、粒子の散乱断面積 Φ 、粒子密度 N_p 、光学媒質の光伝搬方向の長さ L_G 、補正係数 K_C および損失係数 K_L により取り出し効率 E_{out} を決定できる。言い換えれば、所望の光取り出し効率 E_{out} が与えられたとき、上記(14)式を満足させれば、その光取り出し効率 E_{out} が実現される。

【0041】

<Fresnel損失因子>

Fresnel損失は、まず反射率を考え、p偏光成分をR_p、s偏光成分をR_sとすれば

$$R_p = \tan(\theta_i - \theta_r) / \tan((\theta_i + \theta_r)) \dots \dots (15a)$$

$$R_s = -\sin(\theta_i - \theta_r) / \sin((\theta_i + \theta_r)) \dots \dots (15b)$$

ここで、θ_i：入射角

θ_r：屈折角

となる。故に反射光の強度I_rは、(15a)、(15b)式より

$$I_r = (R_p^2 + R_s^2) / 2 \dots \dots (16)$$

この(16)式より透過光強度I_tは、

$$I_t = 1 - I_r \dots \dots (17)$$

となり、入射光の強度分布を考慮した透過光強度をI_{t'}すると(17)式は、

$$I_{t'}(\theta_i) = I_t(\theta_i) \cdot D(\theta_i) \dots \dots (18)$$

D(θ_i)：強度分布関数

となる。

【0042】

<Fresnel損失の算出>

任意の拡がり角の有る光束が光学媒質に入射する場合、任意の入射角θ_iに対し、Fresnel損失は変化する。光束の最大入射角をθ_{max}とすると、境界面におけるFresnel損失は、

【数2】

$$\int_0^{\theta_{max}} I_t(\theta_i) \cdot D(\theta_i) d\theta_i / \int_0^{\theta_{max}} D(\theta_i) d\theta_i \dots \dots (19)$$

で表される。

【0043】

ここで、計算の簡素化のために入射光の強度分布を矩形とすると上記(19)式は

【数3】

$$\int_0^{\theta_{\max}} I_t(\theta_i) d\theta_i / \int_0^{\theta_{\max}} d\theta_i \quad \dots \dots \quad (20)$$

となる。この(20)式に基づいて、光学媒質の種々屈折率に対するFresnel損失を求めた結果を図6に示す。なおこの図6では、縦軸に透過率を取って損失を示してある。つまり、透過率1が損失0(ゼロ)である。

【0044】

<Fresnel損失を含む光取り出し効率の算出>

上記の図6から、入射角が30°以下の場合、光学媒質の屈折率と周囲媒体の屈折率が大きく異なっていても、Fresnel損失はほぼ同じになることが分かる。今、光学媒質がシート状直方体の場合、反射・屈折において光線の方向余弦は保存され、入射角と出射角は粒子が存在しない場合、同じになると考えられる。また、内部透過率T_{in}=1と近似できる場合は、入射面の透過率と出射面の透過率の積が全透過率T_{total}となる。よって光学媒質の屈折率をn=1.5とすると、T_{total}=0.92となる。

【0045】

故に(14)式は、

$$E_{out} = e \times p \{ - (\Phi \cdot N_p \cdot L_G \cdot K_C) \} \cdot 0.92 \dots \dots (14b)$$

となる。この(14b)式により、粒子径と光取り出し効率との関係を求めた結果を図7a～eに示す。なお、入射光の強度に分布が有る場合や、入射光の入射角度が30°以上になる場合は、(19)式、(20)式によりFresnel損失を求め(14b)式に代入すればよい。ただし、出射時には臨界角を考慮して、入射光の広がりは半角で30°程度にするのが望ましい。

【0046】

上記の図7a～eは、本計算方法において、まず各粒子径の平均的な狙いの光取り出し効率を定め、それに対し各粒子径における計算値(10mmC、100mmC、1000mmC)と本計算で用いた粒子径、粒子密度による精密なシミュレーション(S=10mm、S=100mm、S=1000mm)の結果を示

している。平均的な狙いの光取り出し効率は、図7 a、7 b、7 c、7 d、7 eにおいてそれぞれ80%，70%，60%，50%，40%である。散乱断面積 Φ は、粒子径20nmの場合はRayleigh理論により、また粒子径200nm以上についてはMie理論により求めた。Sはシミュレーションを表し、Cは本計算によることを表している。また数値は光学媒質の光伝搬方向の長さ L_G を表している。

【0047】

この図7 a～eによれば、平均的な狙いの光取り出し効率が60%以上であれば、精密なシミュレーションの結果と10%未満の誤差におさまっており、よく一致していることが分かる。すなわち、言い換えれば、 $\Phi \cdot N_p \cdot L_G \cdot K_C$ の値が0.4以下であれば、誤差が10%未満におさまることを表している。また、上記値が0.9以下であっても、誤差は50%未満におさまることを同時に表している。なお K_L の値は、経験的に求めた値0.92を用いた。シミュレーションや試作を行う上では、誤差が50%程度生じていても、光取り出し効率の狙いを付けるためには特に問題無いと考えられる。言うまでもなく、誤差が10%未満であればシミュレーションをする必要性は無く、また数種類のサンプルを評価し、絞り込む必要性が無くなるため、開発効率が向上するという効果が得られる。

【0048】

上述の結果から、Mie散乱の複雑な理論に頼らなくても、比較的簡便なRayleigh領域とMie散乱収束領域の結果を基に(14)式を用いて、光の取り出し効率について見通しの良い解を得ることが可能であると考えられる。本方法は、この知見に鑑みてなされたものであり、前述のように

$$E_{out} = e \times p \cdot \{ -(\Phi \cdot N_p \cdot L_G \cdot K_C) \} \cdot K_L$$

を満足させることにより、所望の光取り出し効率 E_{out} を実現する。

【0049】

＜計算例＞

(14)式に基づいてシート状直方体について計算した結果を、表1～3および図8 a～cに示す。なお、表1の数値をグラフに表したもののが図8 aであり、

以下同様に、表2と図8b、表3と図8cが順次対応している。これらの表中の計算結果において、 $\Phi \cdot N_p \cdot L_G \cdot K_C$ の値はいずれも0.9以下になっている。なお、いずれの場合も、 K_L の値は0.92である。

【0050】

【表1】

$E_{out} = 0.8$					
粒子径 (nm)	散乱断面積 (m ²)	粒子密度 (個/mm ³)	$W \times T \times L_G$ (mm)	取り出し効率 (14)式 (%)	取り出し効率 S I M (%)
20	1.1×10^{-22}	1.0×10^{13}	$4 \times 1 \times 20$	84	87
		2.5×10^{12}	$16 \times 1 \times 80$		88
		6.3×10^{11}	$64 \times 1 \times 320$		88
200	1.5×10^{-14}	3.0×10^7	$4 \times 1 \times 20$	89	89
		7.5×10^6	$16 \times 1 \times 80$		89
		1.9×10^8	$64 \times 1 \times 320$		89
2000	12.6×10^{-12}	3.0×10^5	$4 \times 1 \times 20$	68	75
		7.5×10^4	$16 \times 1 \times 80$		76
		1.9×10^4	$64 \times 1 \times 320$		76
20000	6.3×10^{-10}	3.0×10^3	$4 \times 1 \times 20$	79	86
		7.5×10^2	$16 \times 1 \times 80$		86
		1.9×10^2	$64 \times 1 \times 320$		86
200000	6.3×10^{-8}	3.0×10^1	$4 \times 1 \times 20$	79	90
		7.5×10^0	$16 \times 1 \times 80$		90
		1.9×10^0	$64 \times 1 \times 320$		90
直方体（シート） 注) S I M : シミュレーション					

【表2】

$E_{out}=0.7$							
粒子径 (nm)	散乱断面積 (m ²)	粒子密度 (個/mm ³)	W × T × L _c (mm)	取り出し効率 (14)式 (%)	取り出し効率 S I M (%)		
20	1.1×10^{-22}	2.0×10^{13}	$4 \times 1 \times 20$	78	82		
		5.0×10^{13}	$16 \times 1 \times 80$		83		
		1.3×10^{12}	$64 \times 1 \times 320$		83		
200	1.5×10^{-14}	6.0×10^7	$4 \times 1 \times 20$	85	85		
		1.5×10^7	$16 \times 1 \times 80$		85		
		3.8×10^6	$64 \times 1 \times 320$		84		
2000	12.6×10^{-12}	4.5×10^5	$4 \times 1 \times 20$	59	65		
		1.1×10^5	$16 \times 1 \times 80$		65		
		2.8×10^4	$64 \times 1 \times 320$		58		
20000	6.3×10^{-10}	4.5×10^3	$4 \times 1 \times 20$	73	79		
		1.1×10^3	$16 \times 1 \times 80$		79		
		2.8×10^2	$64 \times 1 \times 320$		70		
200000	6.3×10^{-8}	4.5×10^1	$4 \times 1 \times 20$	73	86		
		1.1×10^1	$16 \times 1 \times 80$		86		
		2.8×10^0	$64 \times 1 \times 320$		78		
直方体（シート）							
注) S I M : シミュレーション							

【表3】

$E_{out}=0.6$							
粒子径 (nm)	散乱断面積 (m ²)	粒子密度 (個/mm ³)	W × T × L _c (mm)	取り出し効率 (14)式 (%)	取り出し効率 S I M (%)		
20	1.1×10^{-22}	3.2×10^{13}	$4 \times 1 \times 20$	70	78		
		8.0×10^{12}	$16 \times 1 \times 80$		79		
		2.0×10^{12}	$64 \times 1 \times 320$		79		
200	1.5×10^{-14}	1.2×10^8	$4 \times 1 \times 20$	79	78		
		3.0×10^7	$16 \times 1 \times 80$		78		
		7.5×10^6	$64 \times 1 \times 320$		77		
2000	12.6×10^{-12}	9.0×10^5	$4 \times 1 \times 20$	37	41		
		2.3×10^5	$16 \times 1 \times 80$		40		
		5.6×10^4	$64 \times 1 \times 320$		36		
20000	6.3×10^{-10}	9.0×10^3	$4 \times 1 \times 20$	59	60		
		2.3×10^3	$16 \times 1 \times 80$		60		
		5.6×10^2	$64 \times 1 \times 320$		52		
200000	6.3×10^{-8}	9.0×10^1	$4 \times 1 \times 20$	59	73		
		2.3×10^1	$16 \times 1 \times 80$		73		
		5.6×10^0	$64 \times 1 \times 320$		64		
直方体（シート）							
注) S I M : シミュレーション							

図8 a～cにおいて (C) 、 (S) はそれぞれ本計算の結果、精密なシミュレ

ーションの結果を表している。また数値は光学媒質の寸法（mm）である。また粗い光取り出し効率は、各粒子径における平均としている。表1～3および図8 a～cから明らかなように、本計算の結果とシミュレーション結果とがよく一致していることが分かる。特に粒子径2000 nmにおける結果は、本計算方法がシミュレーションに一致することをより一層明白にしている。

【0051】

<出射光強度分布特性>

出射光強度分布特性は、光源の強度分布、広がり角、光源の数と配置などに影響を受けるため、シミュレーションにて評価した。そのようにして求めた粒子径毎の出射光強度分布特性を図9 a、b、cに示す。ここで、光源は光学媒質の入射側断面の中心に位置させたものとし、広がり角を半角で30°とした。図9 a、b、cは表1と同じ条件でシート状直方体の場合についてシミュレーションした結果であり、それぞれシートサイズが小、中、大の場合を示している。

【0052】

これらの図から、断面が矩形の光学媒質において光取り出し効率90%前後で、ほぼ均一な強度分布が実現されていることが分かる。以上の考察および計算機シミュレーションから、任意の光学媒質に光散乱を生じさせる粒子を混入して導光体を製造する場合には、まず(14)式に基づいて、各粒子径による散乱断面積、粒子密度、光学媒質の寸法などから、光取り出し効率を予め絞り込むこともできる。そしてさらに、光強度分布特性を精密なシミュレーションにより求めるようにしてもよい。あるいは、(14)式から予め絞り込んだ条件に沿って数種類のサンプルを製作し、実験的に評価することも可能である。

【0053】

そして本発明で用いられるシート状導光体は、前述した通り $\Phi \cdot N_p \cdot L_G \cdot K_C \leq 0.9$ の関係を満足する構成としたことにより、シミュレーションとの誤差が10%未満におさまるので、良好な光取り出し効率および、均一な出射光強度分布を実現することができる。

【0054】

また本発明で用いられるシート状導光体は、光学媒質内の粒子で散乱を繰り返

させながら光を伝搬させるものであるので、一方の端面から光を入射させて他方の端面に伝搬させることも、また上記他方の端面から光を入射させて上記一方の端面に伝搬させることも同じように可能である。そこで、このシート状導光体を用いる本発明のシート状導光体を用いた通信システムは、双方向通信することも可能となる。

【0055】

＜シート状導光体を用いた通信システムの必要条件＞

代表的な通信用シート状導光体を図10に示す。シート状導光体10は、前述したように例えばPMMA（ポリメチルメタクリレート）等の光学媒質内に光を散乱させる粒子を含有してなり、一端面から入射した光を上記粒子により散乱せながら別の端面側に伝搬させるものである。そしてこのシート状導光体10の一端面には複数の光ファイバ21、22および23が接続され、他端面には光ファイバ31、32および33が接続される。これらの光ファイバ21～23および31～33としては通常大N.A.（開口数）のものが適用され、双方向の通信を可能にする。

【0056】

光ファイバで受光する場合の条件について考察する。文献“High-Uniformity Star Coupler Using Diffused Light Transmission” IEICE TRANS. ELECTRON, Vol.E84C, No.3 MARCH 2001 p339（以下、非特許文献1という）によれば、通信用シート状導光体システムにおける受光器への要求は、以下の通りである。

【0057】

《受光器の最小受光光量が20.5dBm（0dBm=1mW）以上必要》

これは、500Mbpsの信号を送受信した場合のBit-Error-Rate（BER）より算出されており、また受光器はPINフォトダイオードであるため、受光器が異なる場合（例えばフォトマルチプライヤ、アバランシェフォトダイオードなど）、或いは送信帯域が異なる場合には参考にはならない。すなわち、任意の受光器において、ある送信帯域において許され得る最小受光光量というものが存在するはずである。これより、上記の条件を満足する受光器の許容最小受光量をP(Receiver)minと定義する。

【0058】

まず上記の条件からシート状導光体の出射光強度分布がフラットな場合について制約条件を求める。この出射光強度分布がフラットな場合でも、一本の光ファイバにおいて導光路と光ファイバの断面の面積比 $\pi/4$ が必ず損失につながる。ただし、光ファイバのコア径がシート状導光体の厚みに等しいとする。また公差は、今は考慮しない。

【0059】

分岐数（ノード数）をNとすると、光量は $1/N$ に下がり、かつそのうち $\pi/4$ を損失分として計上すると、理想的な場合、受光器が受光する光量 P (Receiver) は、

$$P(\text{Receiver}) = E_{\text{out}} \cdot (1/N) \cdot \pi/4 \dots (21)$$

ここで受光器は、光ファイバからの出射光すべてを受光するものとする。これより、導光体への入射光の光量を P_{in} とすると (21) 式は

$$P(\text{Receiver}) = P_{\text{in}} \cdot E_{\text{out}} \cdot (1/N) \cdot \pi/4 \dots (22)$$

となる。この (22) 式の対数をとって受光器の受光光量を $d\text{Bm}$ で表すと、

$$P(\text{Receiver}) \text{dBm} = -10\log \{ P_{\text{in}} \cdot E_{\text{out}} \cdot (1/N) \cdot \pi/4 \} \dots (23)$$

受光光量と分岐数（ノード数）の関係を、入射光量が 1mW 、 10mW の場合について図 1-1 に示す。この図 1-1 から分かるように、当然のことながら受光光量は出射光量に比例する。また、ここではシート状導光体からの出射光の強度分布をフラットなものと想定しているが、実際には光源の位置が変われば出射光の強度分布も変化する。すなわち、受光光量に増減が生じ、出射光強度の最小部において受光光量も最小になると考えられる。

【0060】

ここで、導光体への入射光量 P_{in} が与えられたとき、光源が任意の位置にある場合の出射光の分布形状を、出射光強度分布が長辺となっている方向を x 、短辺となっている方向を y として、規格化強度分布関数 $D(x, y)$ で表す。また分岐数（ノード数）で分割された入、出射部における 1 単位をセグメントと呼ぶことにし、各セグメントの中心に光ファイバの中心（光軸）を理想的に位置決めするものとする。

【0061】

故に、 i 番目のセグメントにおける出射光量の規格化された平均値 NP_i は、 Seg_i を i 番目のセグメントにおける積分領域とすると、

【数4】

$$NP_i = \int_{Seg_i} D(x, y) dx dy / \int_{Segmax} D(x, y) dx dy \dots (24)$$

ここで、 $Segmax$ は全セグメント中で最大の光量となるセグメントを表す。また、光量が最小となる場合のセグメントにおいては、

【数5】

$$NP_i (\min) = \int_{Segmin} D(x, y) dx dy / \int_{Segmax} D(x, y) dx dy \dots (25)$$

となる。(23)式において出射全光量 $Pout$ は、

$$Pout = Pin \cdot Eout \dots (26)$$

である。これより i 番目のセグメントにおける光量 $PSeg_i$ は、分岐数=セグメント数=ノード数であるから、

【数6】

$$PSeg_i = Pout \cdot \{ NP_i / \sum_{i=1}^n NP_i \} \dots (27)$$

となる。なお本明細書では、上記(数6)式に含まれる

【数7】

$$\sum_{i=1}^n NP_i$$

を便宜的に ΣNP_i と表すこととする。

【0062】

上記(23)式、(27)式をまとめて、出射光強度分布がフラットな場合の $1/N$ に換えて、

$$P(Receiver) dBm = -10 \log \{ Pin \cdot Eout \cdot (NP_i / \Sigma NP_i) \cdot \pi / 4 \}$$

となる。いま必要な数値は、光ファイバから出射する光量が最小の場合であり、それは(25)式より与えられる。すなわち、 $P(Receiver_{\min}) dBm$ を受光器の得る最小受光光量とすると、上記式から

$$P(\text{Receiver_min})_{dBm} = -10\log\left\{\frac{P_{in} \cdot E_{out} \cdot (N_{Pi(min)} / \sum N_{Pi})}{\pi / 4}\right\} \dots \quad (28)$$

となる。ここで P_{in} : 入射光量、 E_{out} : 光の取り出し効率、 $N_{Pi(min)}$: 最小光量となるセグメントの光量、 $\sum N_{Pi}$: セグメントの光量和である。

【0063】

また、ある BER を満足するために受光器に必要な最小光量を $P_{Rmin(dBm)}$ とすると $P_{Rmin(dBm)} \leq P(\text{Receiver_min})_{dBm}$ であり、さらに発光器と光ファイバとの結合損失を K_E 、光ファイバとシート状導光体との結合損失を K_F 、光ファイバと受光器との結合損失を K_R 、光ファイバの内部損失 K_{FI} とすると、

$$P_{Rmin(dBm)} \leq P(\text{Receiver_min})_{dBm} \cdot K_E \cdot K_F \cdot K_R \cdot K_{FI} \dots \quad (29)$$

であり、この (29) 式がシート状導光体を用いた通信システムの必要条件になる。

【0064】

<BER (Bit-Error-Rate)>

BER は、ランダムに発生させたデジタル信号のある通信媒体を通じて送信し、受信したデジタル信号が元のデジタル信号に対してどの程度の食い違いをしているかを表す指標であり、送信したビット数を Bits、ビットエラー数を Biter とすると、

$$BER = Biter / Bits \dots \quad (30)$$

で表される。

【0065】

次に、ビットエラーの発生するメカニズムについて考察する。まず、デジタル変換する際のアナログ波形の歪が、第一要因として挙げられる。また信号レベルが低下した際にビットエラーが増加することから、S/N も要因として考える必要がある。波形の歪により信号レベルが低下しても、それが (0, 1) 信号を区別する閾値を安定して超えていればビットエラーは発生しないはずであり、ノイズが外部から飛来し、あるいは内部から発生することにより、歪んだ波形にレベ

ル変化を与えそれがビットエラーの原因になると考えられる（図12参照）。

【0066】

シート状導光体を用いた通信システムにおける波形歪みの最大因子は、任意の入射セグメントと出射セグメントとが対応した受信信号自身の歪みと、各入射セグメントと任意の出射セグメントに対応したミキシング信号に含まれる各信号成分の位相ずれによる波形歪であると考えられる。そして上記の波形歪は信号光の光路差に起因している。光ファイバとシート状導光体とを用いた通信システムにおいて光路差を生じる要素は、シート状導光体自身と光ファイバである。すなわちビットエラーは、アナログ信号をデジタル変換する際に、波形歪により信号レベルが予め決められた閾値を下回ることにより生じると推定される。さらにデジタル信号を送信する際には、基準信号（基準クロック）を付随させるとし、かつ読み取る際にも基準信号と照合すると考えると、基準信号とデジタル化された信号とに位相差（ジッタ）が大きくなるとビットエラーが発生すると考えられる。また、閾値近傍のデジタル信号はノイズによるゆらぎにより閾値を上下し、間違ったデジタル信号に化ける。すなわち、光路差要因とノイズ要因とが複合してビットエラーが発生すると推測される。

【0067】

＜光路差とBER(Bit-Error-Rate)との関係＞

シート状導光体を用いた通信システムにおける、4、8、16の各ノード数に対する波形歪をそれぞれ図13aおよびb（4ノード）、図14aおよびb（8ノード）、図15aおよびb（16ノード）に示す。これらの通信システムにおいて、光ファイバの外径は全て1mm、長さは光路差を無視できる1mであり、それらは各々光入射側においても光出射側においても互いに密接して並設されている。

【0068】

また各図における「In」と「Out」の数値はそれぞれ、光入射位置、出射位置をシート状導光体の光ファイバ並び方向中央位置からの距離（mm：光を入射させる光ファイバが有る側には-、それと反対側には+で示す）で表している。すなわち、図13aは上記中央位置から-1.5mmの位置に中心がある光ファイ

バ、つまり該中央位置から一方向に2本目の光ファイバ（後述の図18を例に挙げれば光ファイバ21）に光を入射させ、同じ位置に中心がある光ファイバ（同様に光ファイバ31）から光を出射させた場合、図13bは上記と同じ位置の光ファイバ（同様に光ファイバ21）に光を入射させ、上記中央位置から+1.5mmの位置に中心がある光ファイバつまり該中央位置から+方向に2本目の光ファイバ（同様に光ファイバ34）から光を出射させた場合の各波形歪を示している。また図14aは上記中央位置から-3.5mmの位置に中心がある光ファイバ、つまり該中央位置から一方向に4本目の光ファイバに光を入射させ、同じ位置に中心がある光ファイバから光を出射させた場合、図14bは上記と同じ位置の光ファイバに光を入射させ、上記中央位置から+3.5mmの位置に中心がある光ファイバつまり該中央位置から+方向に4本目の光ファイバから光を出射させた場合の各波形歪を示している。また図15aは上記中央位置から-7.5mmの位置に中心がある光ファイバ、つまり該中央位置から一方向に8本目の光ファイバに光を入射させ、同じ位置に中心がある光ファイバから光を出射させた場合、図15bは上記と同じ位置の光ファイバに光を入射させ、上記中央位置から+7.5mmの位置に中心がある光ファイバつまり該中央位置から+方向に8本目の光ファイバから光を出射させた場合の各波形歪を示している。

【0069】

これらの図より、入力信号1Gbpsにおいて、波形歪によるレベル変化は無視できることが分かる。

【0070】

< S/NとBERとの関係 >

読み間違い（ビットエラー）の発生は、信号の質、すなわちS/Nにも関係すると考えられる。つまり、いくら合い隣り合う信号スペクトルの高調波成分を除去した主要成分が分離されても、高調波成分（ノイズ成分）が大きければ、別々の信号として区別できなくなる。極端な場合を想像すると、ノイズ成分に埋もれた信号は特別にフィルタ処理した場合以外は、通常、検出不可能と考えられる。

【0071】

ノイズ成分には熱ノイズ (Jonson Noise) 、量子ノイズ (Shot Noise) 、発光器や受光器に用いる半導体素子特有の $1/f$ ノイズなどのシステム内部で発生するノイズに加えて、放射線ノイズ、誘導ノイズなどの外来ノイズが存在する。ここでは、システム自身の能力について評価するため、外来ノイズは無視することにし、システム内部で発生するノイズに限定して考える。また、 $1/f$ ノイズの影響は無視する。

【0072】

ノイズ成分のパワー（電力）Noise(Total)は、

$$\text{Noise(Total)} = \text{Noise(熱)} + \text{Noise(量子)} \quad \dots \quad (31)$$

で表され、各成分は、受光素子について電力で表記すると、

$$\text{Noise(熱)} = (4kT/R) \cdot \Delta\nu \quad \dots \quad (31a)$$

ただし k : Planck 定数

T : 等価温度（雑音指数により決まる）

R : 受光器の負荷抵抗

$\Delta\nu$: 受光器の帯域

$$\begin{aligned} \text{Noise(量子)} &= 3e^2 \cdot (P + P_B) \cdot \eta \cdot \Delta\nu / (h\nu) \\ &+ 2e^2 i_d \cdot \Delta\nu \quad \dots \quad (31b) \end{aligned}$$

ただし e : 電子の電荷

P : 信号光光量

P_B : 背景光光量

η : 量子効率

h : Planck 定数

ν : 信号光の振動数

i_d : 暗電流

$\Delta\nu$: 受光器の帯域

ここで、0.5 Gbps の信号を作る上で、出力低下が無い 0.25 GHz 帯域の信号を整流することを考える。つまり、フォトダイオードの帯域は 0.25 GHz である。この場合、一例として浜松ホトニクス株式会社製 Si フォトダイオード：S5973 について、 $P = 8.9 \times 10^{-6} W$ (20.5 dBm) 、 η

= 0.4、 $R = 50\Omega$ 、 $T = 300K$ としてノイズ成分を計算すると、電流値に換算して

$$\text{Noise (熱rms)} = 2.88 \times 10^{-7} (\text{A})$$

$$\text{Noise (量子rms)} = 8.19 \times 10^{-8} (\text{A})$$

となり、トータルの雑音成分は、

$$\text{Noise (トータルrms)} = 3.70 \times 10^{-7} (\text{A}) \quad \dots \quad (32)$$

となる。一方、最小受光光量における信号電流 S_c は、

$$S_c = P \cdot e \cdot \eta \cdot h \cdot v \quad \dots \quad (33)$$

で与えられるため、最小受光光量での信号電流 $S(\min)c$ は、

$$S(\min)c = 2.46 \times 10^{-6} (\text{A})$$

となる。故にこの場合の信号対雑音比 (S/N) は、 $S/N(P_{\min}) = 6.65$ となる。

【0073】

さて、ノイズの分布を熱雑音が支配的であるため、Gaussianで近似すると、あるタイミングにおけるシステムノイズが rms ノイズの 6.65 倍になる場合、すなわち信号電流レベル=雑音電流レベル ($S/N = 1$) となる場合のノイズの発生確率 $P_r (S/N = 1)$ は、

$$P_r (S/N = 1) \doteq 3.47 \times 10^{-11}$$

となり、BER $\doteq 10^{-11}$ にはほぼ近い値となり、前記非特許文献1のBERの発生確率に近い値になる。さらに、デジタル信号の伝送に支障の無い 20MHz 程度のハイパスフィルタを使った場合、

$$S/N(P_{\min}) = 6.81$$

$$P_r (S/N = 1) \doteq 1.31 \times 10^{-11}$$

となり非特許文献1の記載にはほぼ一致する。つまり上記の結果が、BERに関してこれまでの推測が正しいと考え得る根拠である。なお図16に、rms (root mean square) ノイズの大きさとその発生確率との関係を示す。

【0074】

さらに、BERに関して推測を一步進めて、より実際的な手法について考察する。まず、シート状導光体を用いた通信システムにおける代表的な rms ノイズ

(電圧値) を測定し、Noise (System_rms) で定義する。また、システムに許容されるBERをBER(accept)とし、そのときの受光信号パワーをPRminとすれば、信号電圧 $S(PR_{min})v$ は、Rを負荷抵抗として、

$$S(PR_{min})v = PR_{min} \cdot e \cdot \eta / (h \cdot v) \times R \quad \dots \dots (34)$$

となる。また、(0, 1)信号の閾値レベルをV(Thresh)とし、閾値レベルを考慮した S/N (Thresh) を、

$$\begin{aligned} S/N(\text{Thresh}) \\ = \{S(PR_{min})v - V(\text{Thresh})\} / \text{Noise}(\text{System}_\text{rms}) \quad \dots \dots (35) \end{aligned}$$

で定義する。(35)式がある値に達したときBERがある確率で発生し、それを S/N_{Accept} とすると、上記の考察から、そのときのNoise (System_rms) の発生確率がBERに等しいと考えられる。図17に、上記の考察から計算したBERと受光光量との関係を示す。この関係は非特許文献1の実測結果に非常に近く、かつ形状もよく近似している。

【0075】

またV(Thresh)について考えると、信号成分からノイズ成分を差し引いた値がこれを下回る場合と、“0”レベルからノイズ成分を加えた値がこれを上回る場合に、BERが発生することになる。故にこのV(Thresh)は、平均信号電圧の半分の値にするのが望ましいと考えられる。

【0076】

以上より、シート状導光体を用いた通信システムにおいて、許容されるBERすなわちBER(accept)が与えられ、またシステムのrmsノイズをNoise (System_rms)とした場合に、Noise (System_rms) の発生確率 $P_r(\text{Noise}(\text{System}_\text{rms}))$ が、信号波形の歪を考慮する必要の無い帯域において、Qを比例定数として、

$$P_r(\text{Noise}(\text{System}_\text{rms}) \cdot Q) \leq \text{BER}(\text{accept}) \quad \dots \dots (36)$$

を満足する大きさのNoise (System_rms) であり、信号レベルが、2値化における任意の閾値V(Thresh)を与えた場合に、

$$\{S(PR_{min})v - V(\text{Thresh})\} > \text{Noise}(\text{System}_\text{rms}) \cdot Q \quad \dots \dots (37)$$

を満足する入力信号PRminであって、かつ上式を満足する受光器から負荷抵抗を

介して出力する信号電圧 $S(PR_{min})v$ となる通信システムが定義できる。

【0077】

あるいは上記（37）式は、前記の理由から

$$S(PR_{min})v / 2 > Noise (System_{rms}) \cdot Q \quad \dots \quad (38)$$

としても定義できる。

【0078】

さらに、BERをシステム内部で測定できるような回路構成を持たせて、BER(accept)を満足するように光源の出力パワー PR_{min} を調整して、（37）式および（38）式を満足させるようにしてもよい。この場合、BER測定回路から光源側にフィードバックするデジタル回路を設け、本デジタル回路は、BER(accept)から決められたテーブルにより光源光量を制御するものとすることにより、システム自身が発生するNoise (System_rms) 以外の外来ノイズにも対応可能となる。

【0079】

【発明の実施の形態】

以下、図面を参照して本発明の実施の形態を詳細に説明する。

【0080】

図18は、本発明の一実施の形態によるシート状導光体を用いた通信システムの平面形状を示すものである。図示されるようにこのシステムは、1つのシート状導光体10の一端面に一例として4本の光ファイバ21、22、23および24が結合されるとともに、他端面にも4本の光ファイバ31、32、33および34が結合されてなる4ノードタイプのものである。シート状導光体10は、厚みが1mm、幅が4mm、長さが30mmに形成されたものである。

【0081】

ここで本実施の形態においては、許容されるビットエラーレート BER(accept)は、一般にエラーフリーとされる限界の 1×10^{-11} である。一方、上記シート状導光体10の光取り出し効率 $E_{out} = 0.9$ とする。この場合、前述の（14）式より、粒子直径を $7 \mu m$ とすると、粒子密度 N_p は 0.93×10^4 (個/mm³) となる。言い換えれば、粒子直径および粒子密度 N_p をこの値にして

おくことにより、(14)式が満足されることになる。

【0082】

次に、このシステムの信号対雑音比(S/N)を求める。前記(28)式に基づくシミュレーションによれば、このとき受光器40が得る最小受光光量P(Receiver_min) dBmは10.5(dBm)となる。ただし、Pin=1.0mW、Eout=0.9、NPi(min)/ΣNPi=0.15とした。

【0083】

そして、最小受光光量P(Receiver_min) dBmとなる任意のノードで前記(28)式および(29)式が満足されるものとする。なおここで、経験的な事実並びに公差解析から、(29)式中の発光器と光ファイバとの結合損失:KE、光ファイバとシート状導光体との結合損失:KF、光ファイバと受光器との結合損失:KRの値はそれぞれ概略1dBであることが分かっている。

【0084】

次に光ファイバの内部損失KF_Iを求める。ここでは、コアがPMMAからなるプラスチック光ファイバを使用するものとし、その場合の光ファイバの伝搬損失は約0.15~0.2dB/mである。該通信システムが配置される装置内の配線を考慮した場合、シート状導光体10の両端で合わせて10m程度のファイバ長さが必要であるとすると、光ファイバの内部損失KF_Iは最大で2dB程度となる。(29)式において、この内部損失KF_Iとその他の結合損失を加算すると、受光器に必要な最小光量PRmin=15.5(dBm)となる。Watts表示ではPRmin=0.028(mW)である。

【0085】

よって信号電流Scは、帯域を500MHzとして(この帯域では、シミュレーション結果から、波形歪は考慮する必要はない)、前述の(33)式よりSc=8.01×10⁻⁶(A)となる。一方ノイズ成分は、前述の(31a)、(31b)式よりNoise(System_rms)=5.28×10⁻⁷(A)である。故にこの場合の信号対雑音比(S/N)は15.2となる。

【0086】

ここでV(Thresh)=S(PRmin)v/2とした上で、上記の結果を(37)式に

代入すると、 $15.2 / 2 = 7.6$ となるので、Noise (System_rms) · 7.6 のノイズ振幅が発生する確率が、所望のBERより小さければよいことになる。この場合のNoise (System_rms) · Q の発生確率は 4×10^{-15} である。つまり、許容されるビットエラーレート BER (accept) = 1×10^{-11} であるので、前記 (36) 式の条件を満足している。

【図面の簡単な説明】

【図 1】

Debye濁度理論による散乱角規格化強度を示すグラフ

【図 2】

Mieの散乱理論による散乱角規格化強度を示すグラフ

【図 3 a】

Mieの理論において、散乱断面積が振動する様子を相対屈折率が1.1のときについて示すグラフ

【図 3 b】

Mieの理論において、散乱断面積が振動する様子を相対屈折率が1.5のときについて示すグラフ

【図 3 c】

Mieの理論において、散乱断面積が振動する様子を相対屈折率が2.1のときについて示すグラフ

【図 4】

粒子径と散乱断面積との関係を、いくつかの相対屈折率毎に計算機シミュレーションで求めた結果を示すグラフ

【図 5】

多粒子系の粒子径と粒子密度の逆数との関係を、計算機シミュレーションで求めた結果を示すグラフ

【図 6】

光学媒質の種々屈折率に対するFresnel損失を示すグラフ

【図 7 a】

粒子径と光取り出し効率との関係を、本発明方法と計算機シミュレーションで

求めた結果を比較して示すグラフ（光取り出し効率 80% 狙い）

【図 7 b】

粒子径と光取り出し効率との関係を、本発明方法と計算機シミュレーションで求めた結果を比較して示すグラフ（光取り出し効率 70% 狙い）

【図 7 c】

粒子径と光取り出し効率との関係を、本発明方法と計算機シミュレーションで求めた結果を比較して示すグラフ（光取り出し効率 60% 狙い）

【図 7 d】

粒子径と光取り出し効率との関係を、本発明方法と計算機シミュレーションで求めた結果を比較して示すグラフ（光取り出し効率 50% 狙い）

【図 7 e】

粒子径と光取り出し効率との関係を、本発明方法と計算機シミュレーションで求めた結果を比較して示すグラフ（光取り出し効率 40% 狙い）

【図 8 a】

シート状導光体における粒子径と光取り出し効率との関係を、計算とシミュレーションとの場合とで比較して示すグラフ（平均光取り出し効率：80%）

【図 8 b】

シート状導光体における粒子径と光取り出し効率との関係を、計算とシミュレーションとの場合とで比較して示すグラフ（平均光取り出し効率：70%）

【図 8 c】

シート状導光体における粒子径と光取り出し効率との関係を、計算とシミュレーションとの場合とで比較して示すグラフ（平均光取り出し効率：60%）

【図 9 a】

シート状導光体における出射光強度分布特性を、シートサイズが小の場合について示すグラフ

【図 9 b】

シート状導光体における出射光強度分布特性を、シートサイズが中の場合について示すグラフ

【図 9 c】

シート状導光体における出射光強度分布特性を、シートサイズが大の場合について示すグラフ

【図10】

シート状導光体の概略形状を示す平面図

【図11】

シート状導光体を用いた通信システムにおける受光光量とノード数との関係例を示すグラフ

【図12】

ビットエラーの発生原因を説明する説明図

【図13a】

シート状導光体を用いたノード数4の通信システムにおける信号光波形歪の一例を示すグラフ

【図13b】

シート状導光体を用いたノード数4の通信システムにおける信号光波形歪の別の例を示すグラフ

【図14a】

シート状導光体を用いたノード数8の通信システムにおける信号光波形歪の一例を示すグラフ

【図14b】

シート状導光体を用いたノード数8の通信システムにおける信号光波形歪の別の例を示すグラフ

【図15a】

シート状導光体を用いたノード数16の通信システムにおける信号光波形歪の一例を示すグラフ

【図15b】

シート状導光体を用いたノード数16の通信システムにおける信号光波形歪の別の例を示すグラフ

【図16】

r m s (root mean square) ノイズの大きさとその発生確率との関係を示すグ

ラフ

【図17】

B E R (Bit-Error-Rate) と受光光量との関係を示すグラフ

【図18】

本発明の一実施の形態による通信システムを示す平面図

【符号の説明】

10 シート状導光体

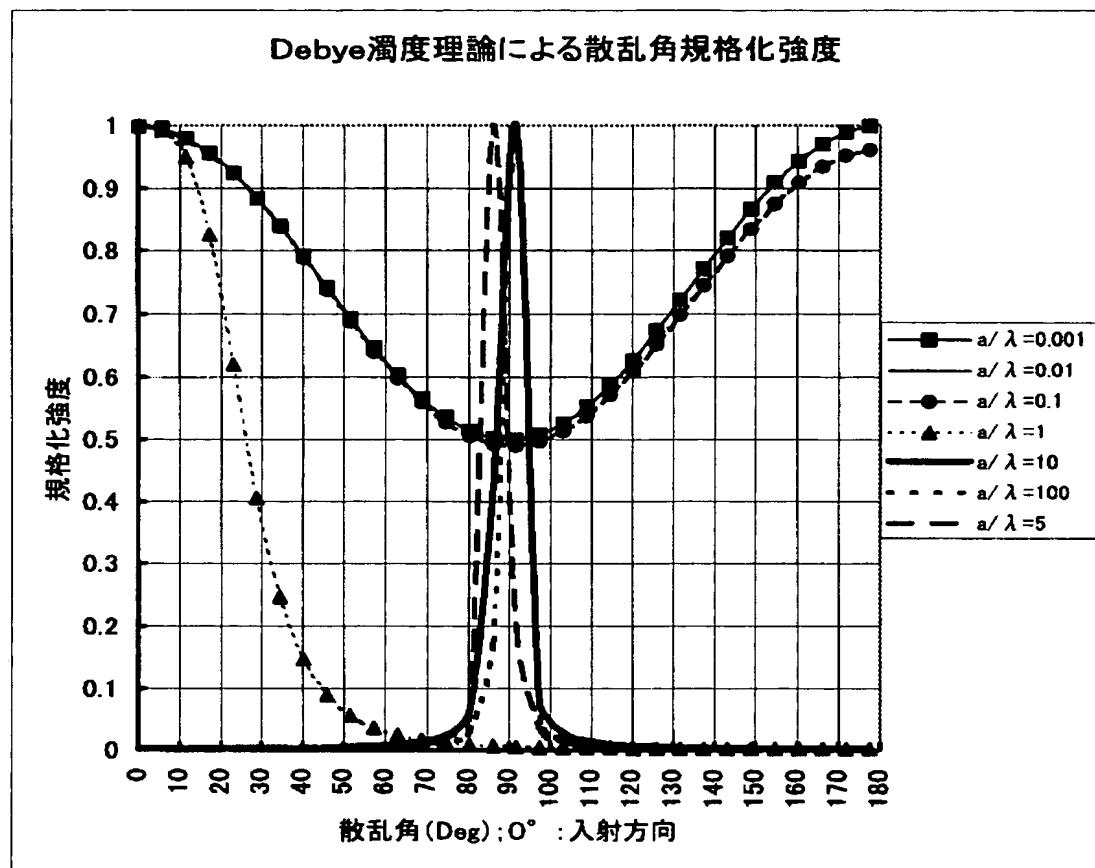
21、22、23、24、31、32、33、34 光ファイバ

40 受光器

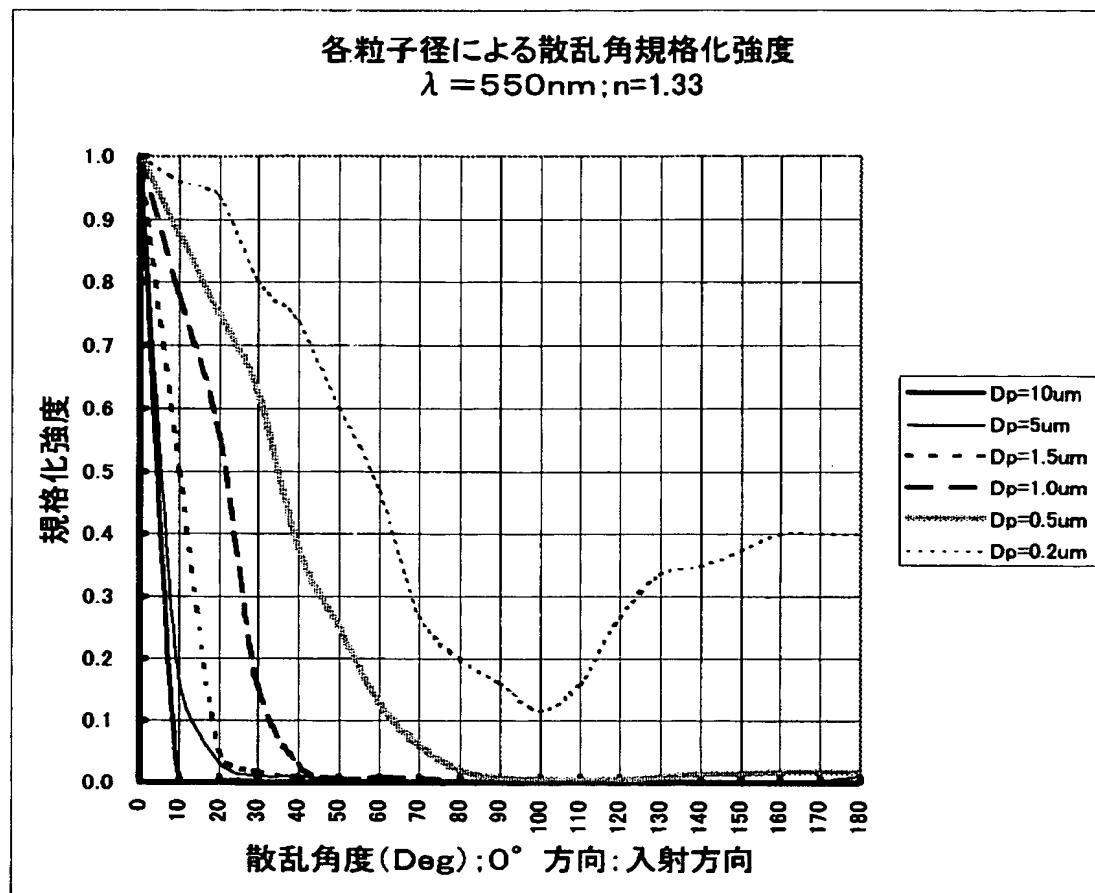
【書類名】

図面

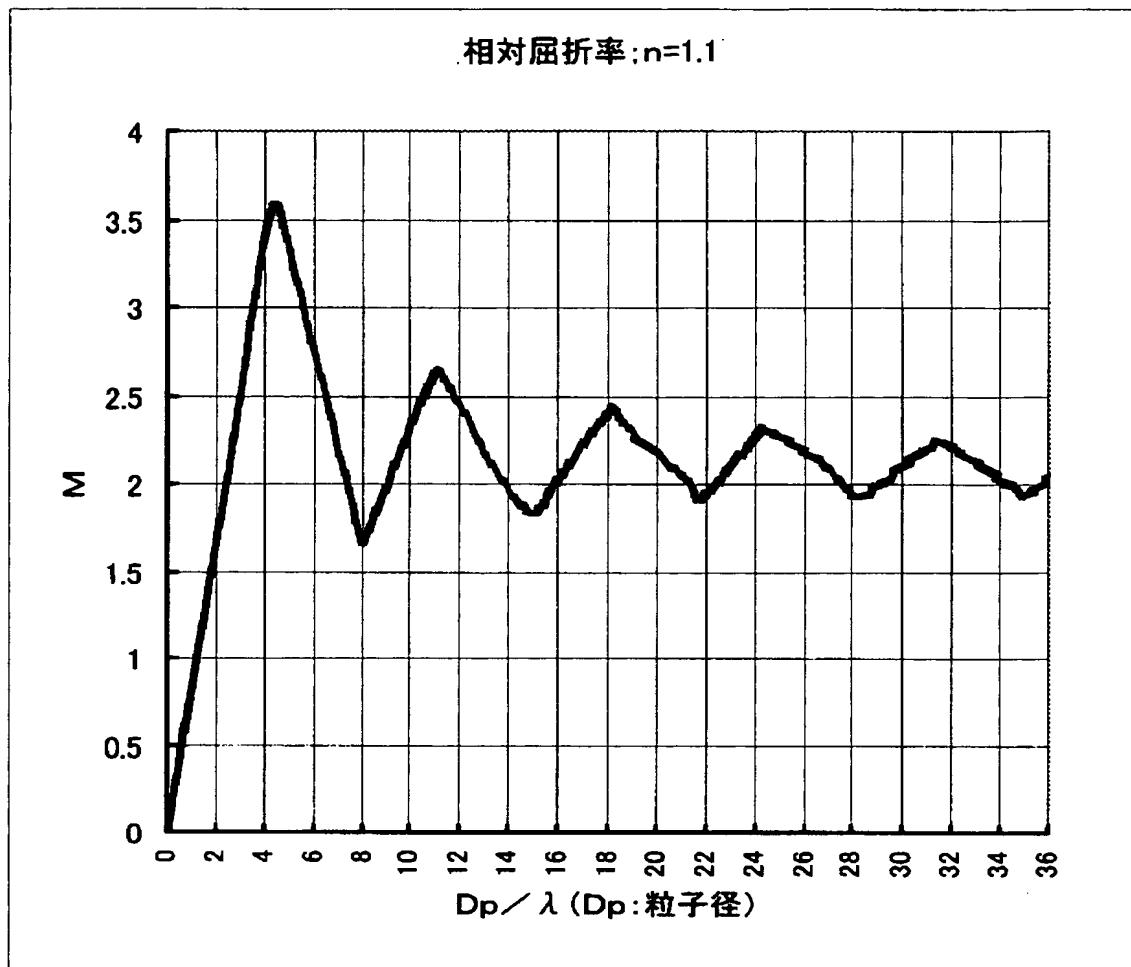
【図 1】



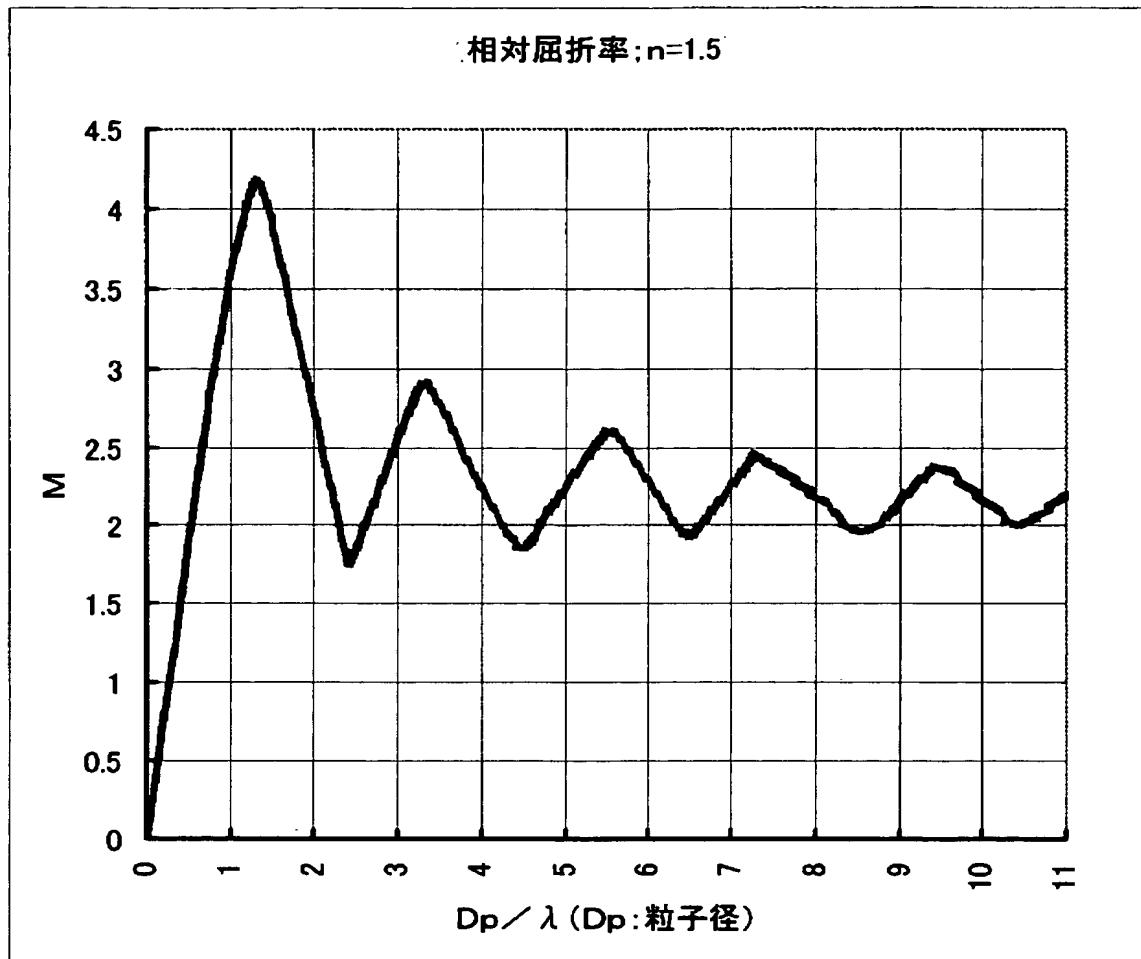
【図2】



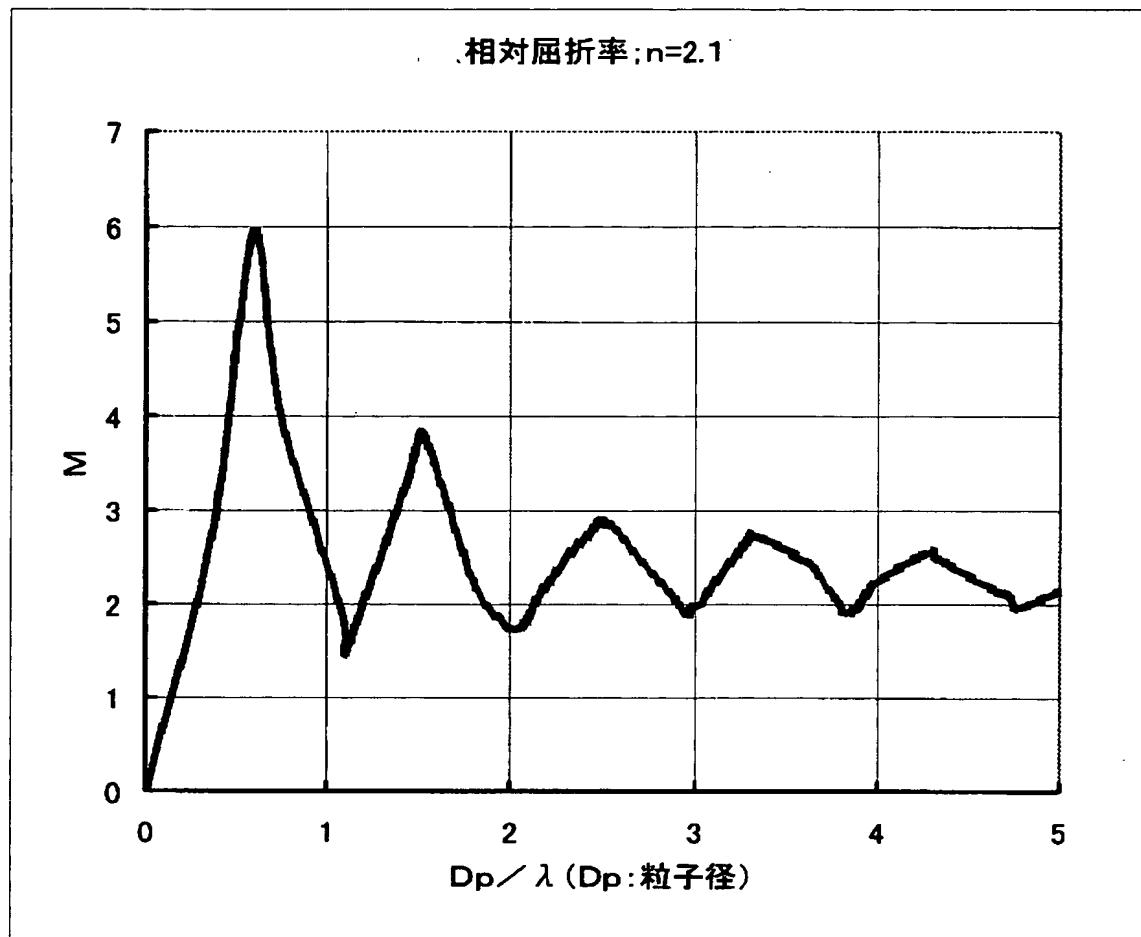
【図3 a】



【図3 b】

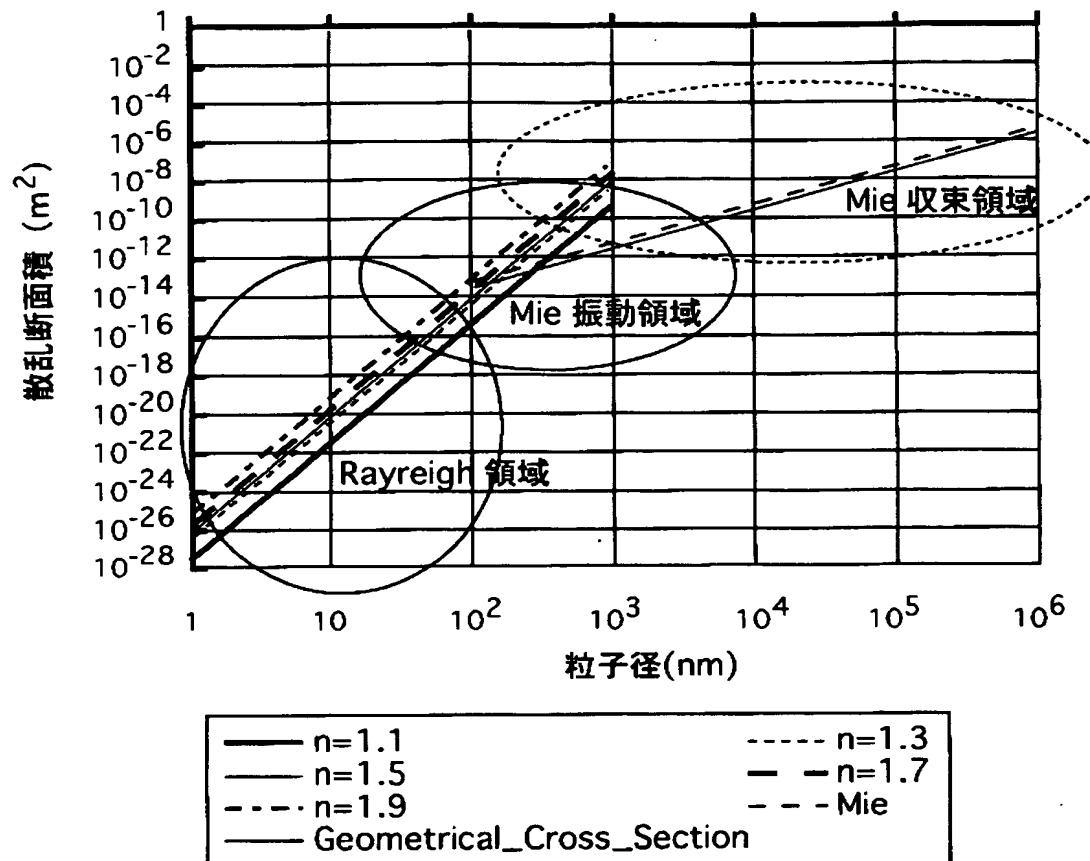


【図3c】

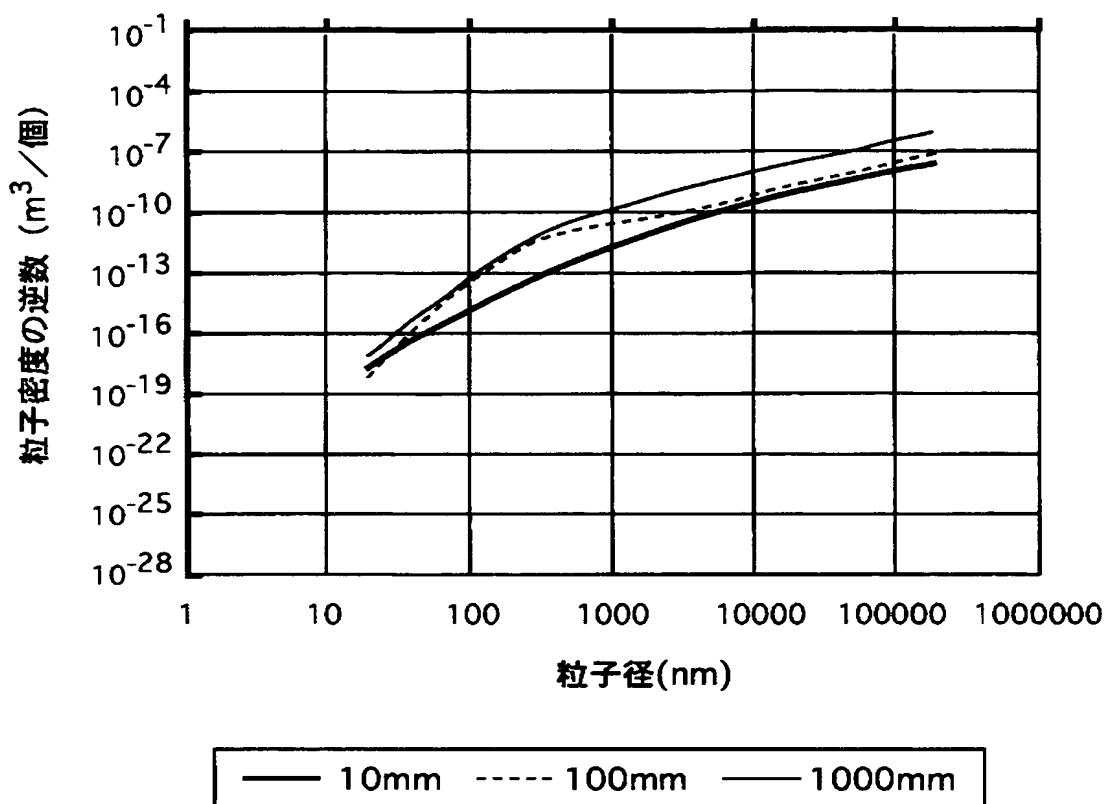


【図4】

散乱断面積比較
Rayleigh vs Fresnel(Mie収束領域)

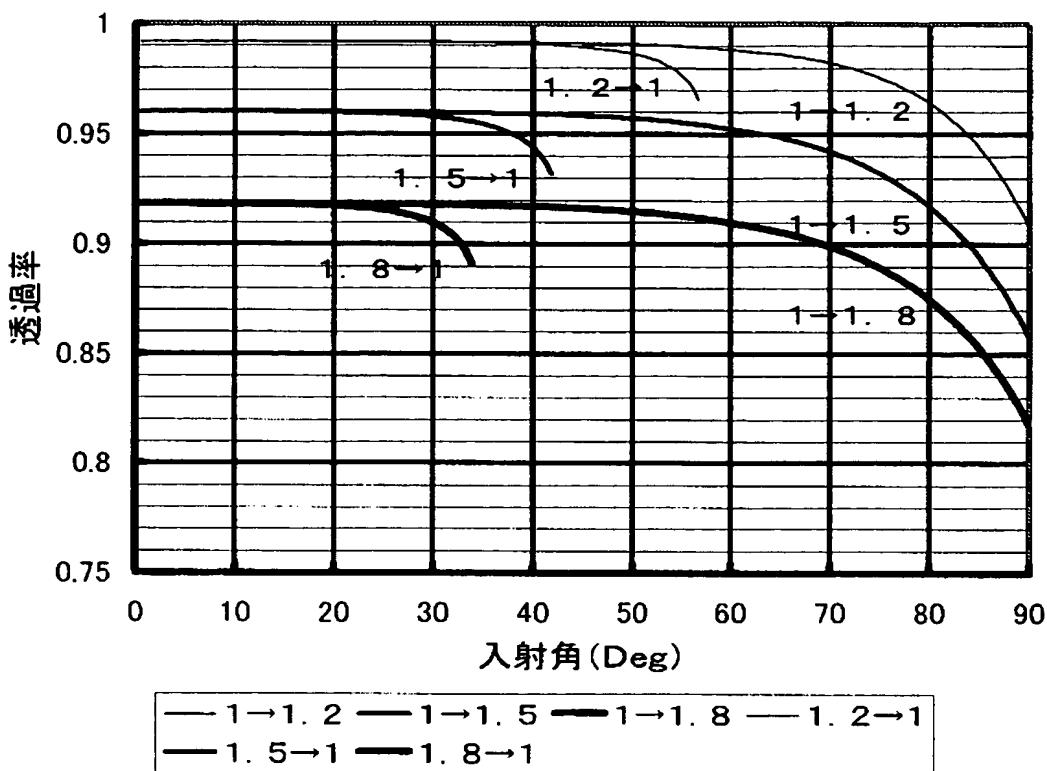


【図5】

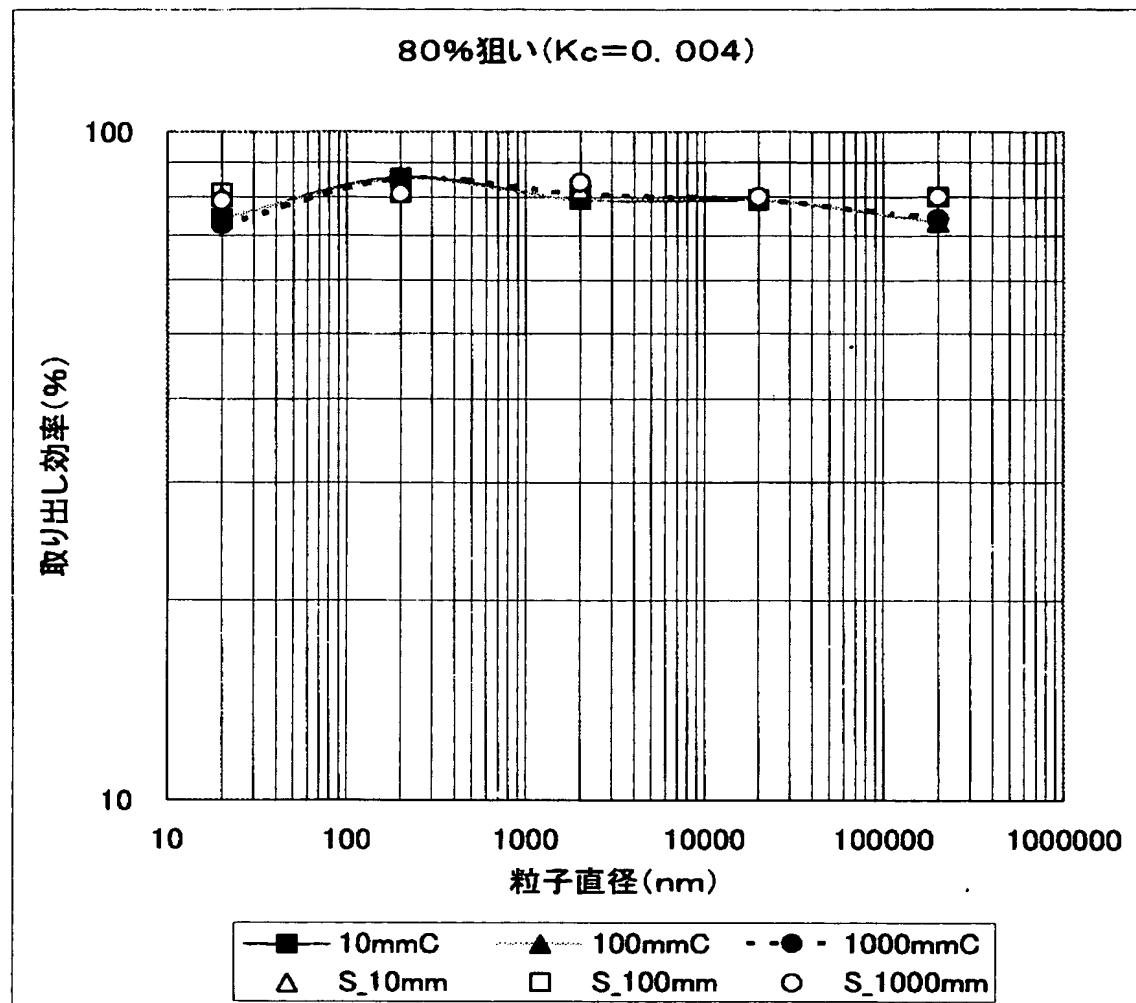
光取り出し効率80%の場合の
粒子径と粒子密度の関係

【図6】

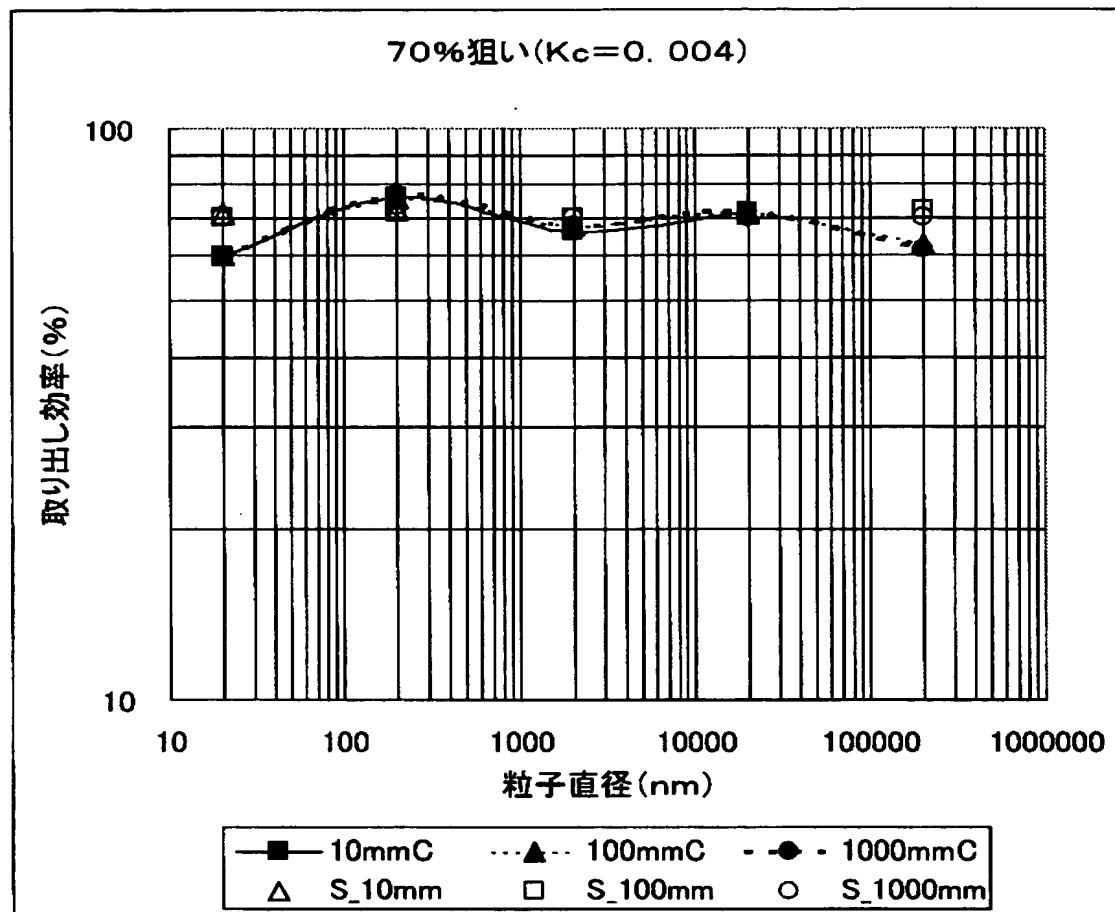
各屈折率におけるFresnel損失



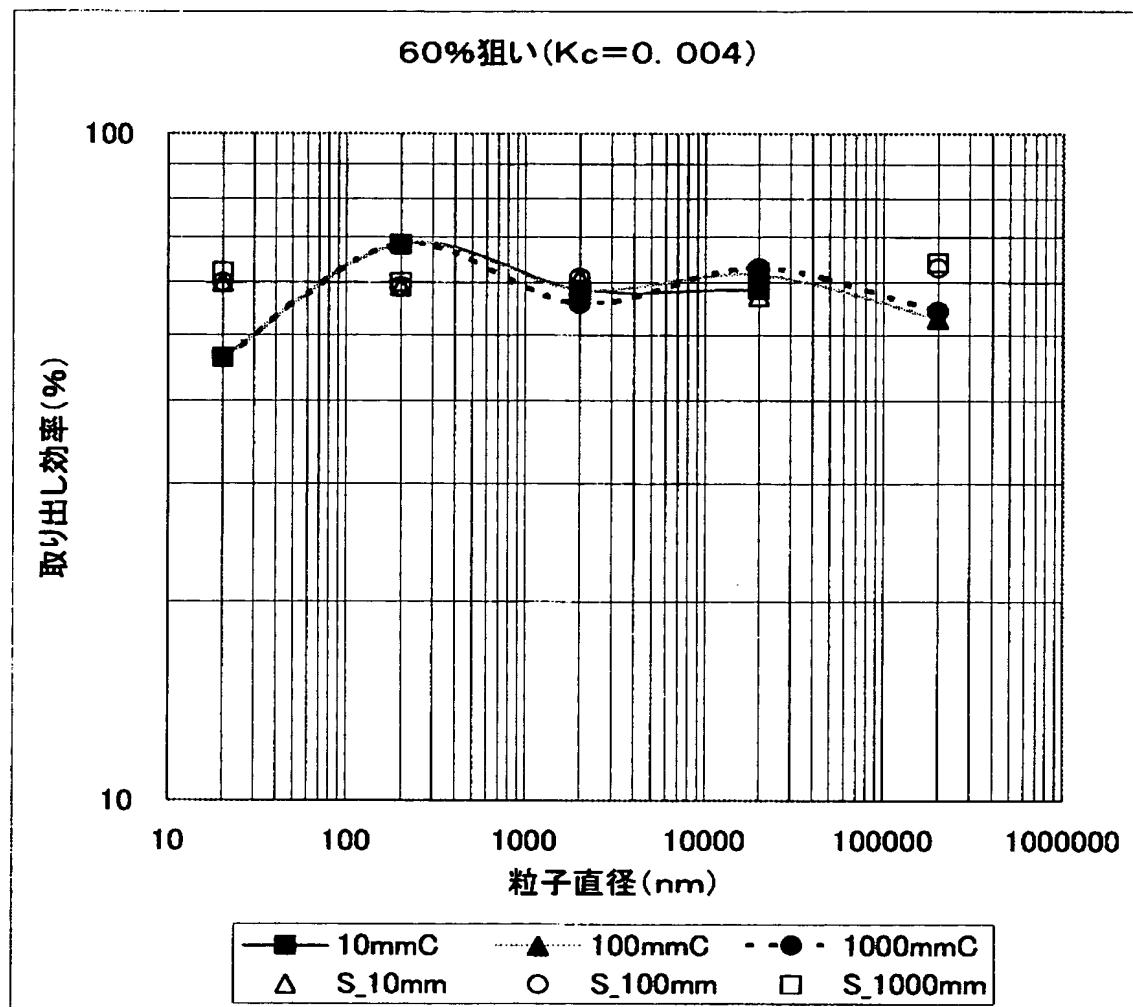
【図 7 a】



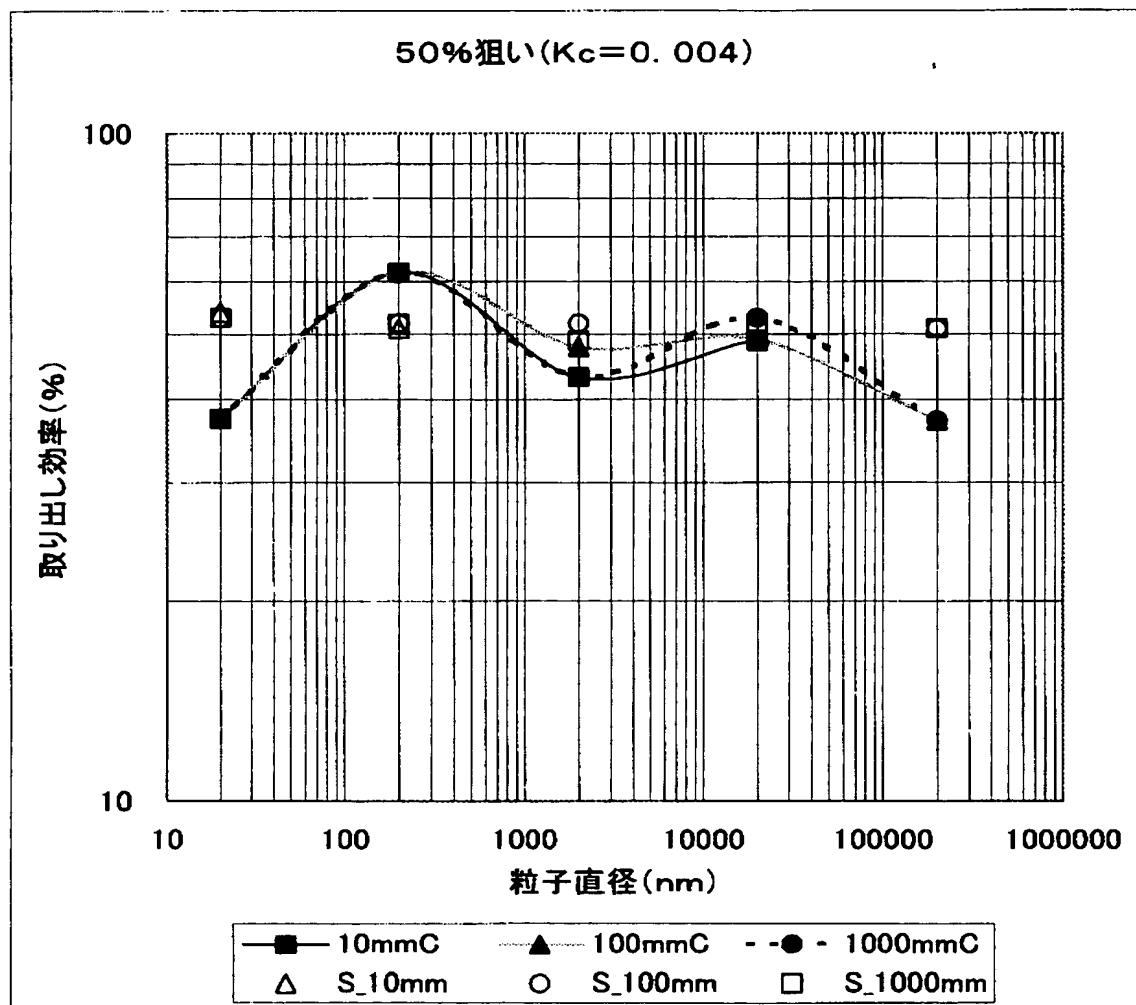
【図 7 b】



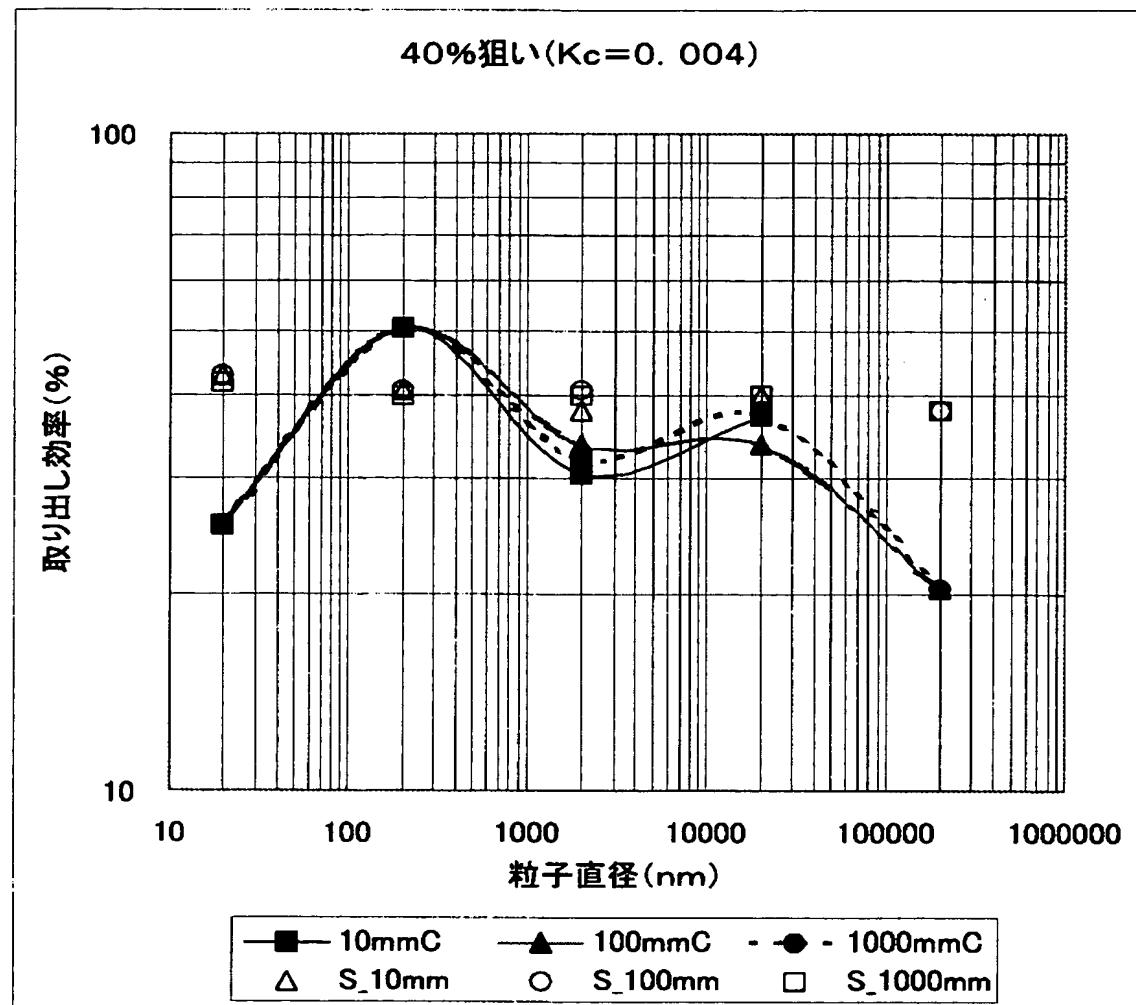
【図7c】



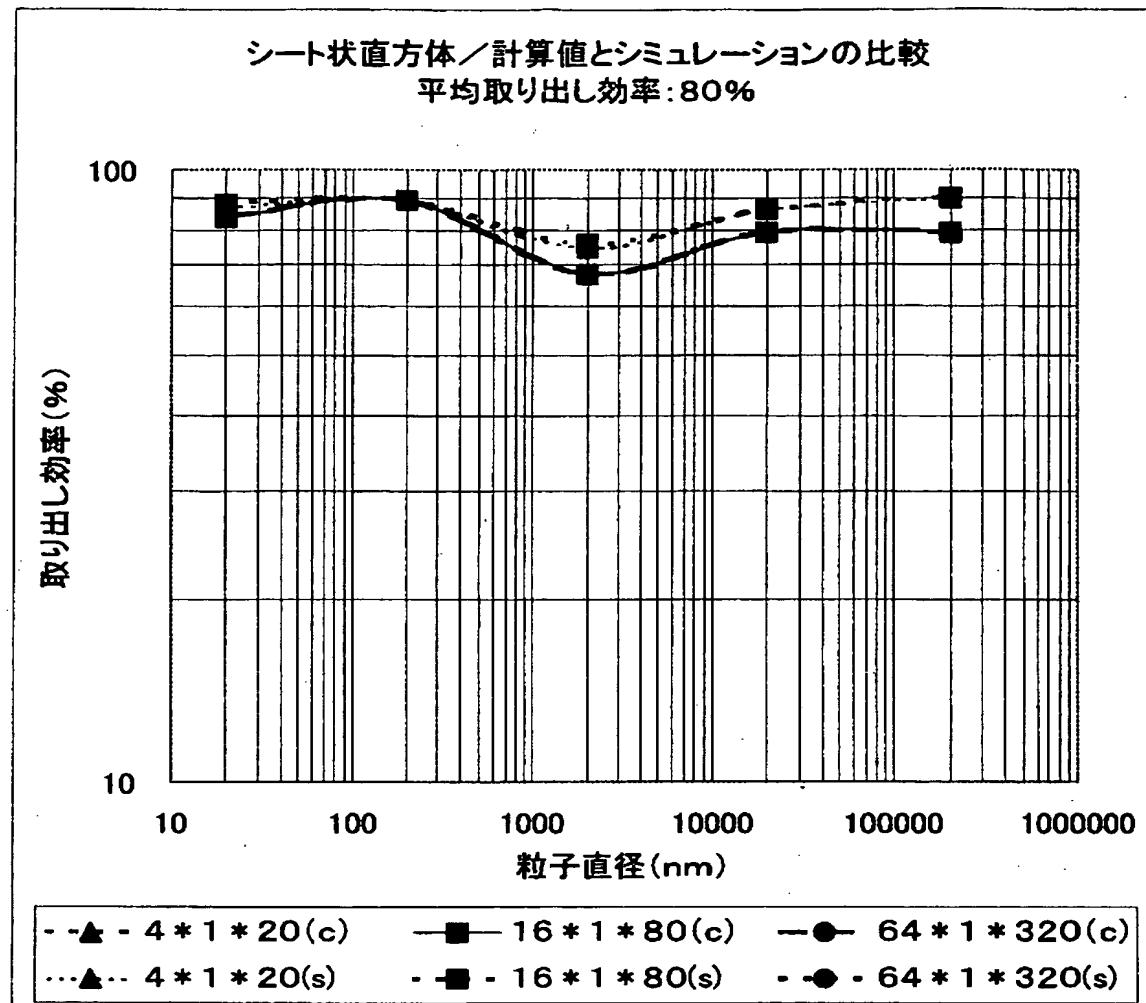
【図 7 d】



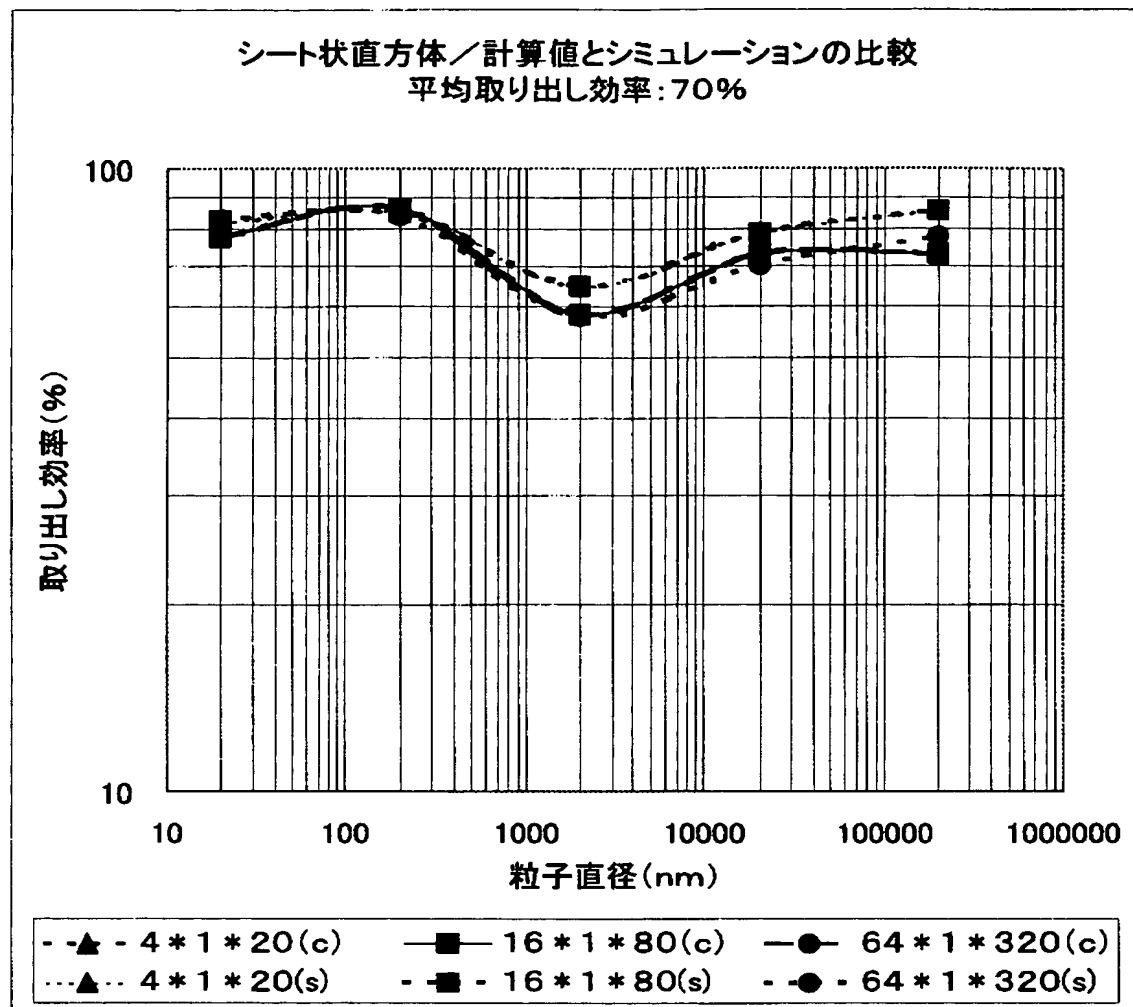
【図7e】



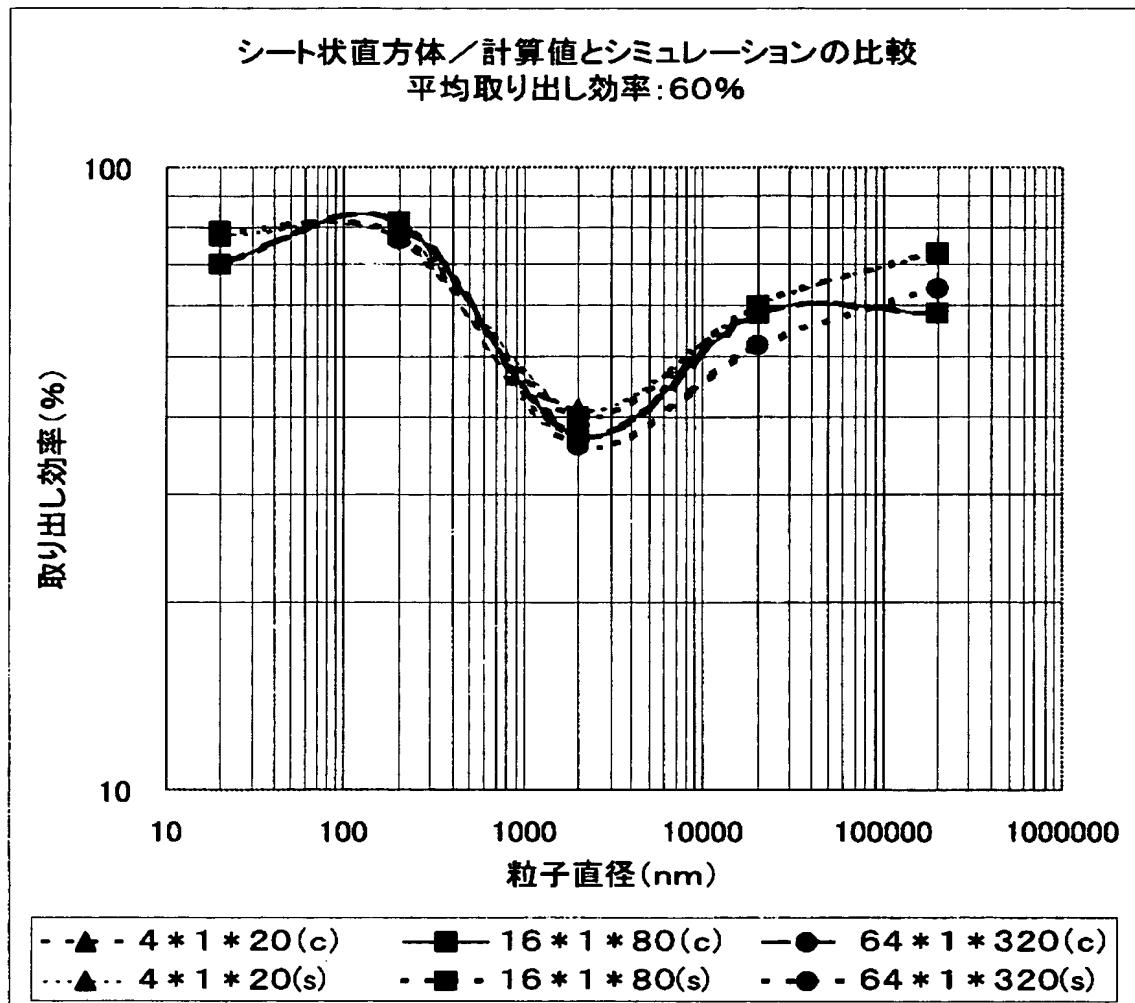
【図8a】



【図 8 b】

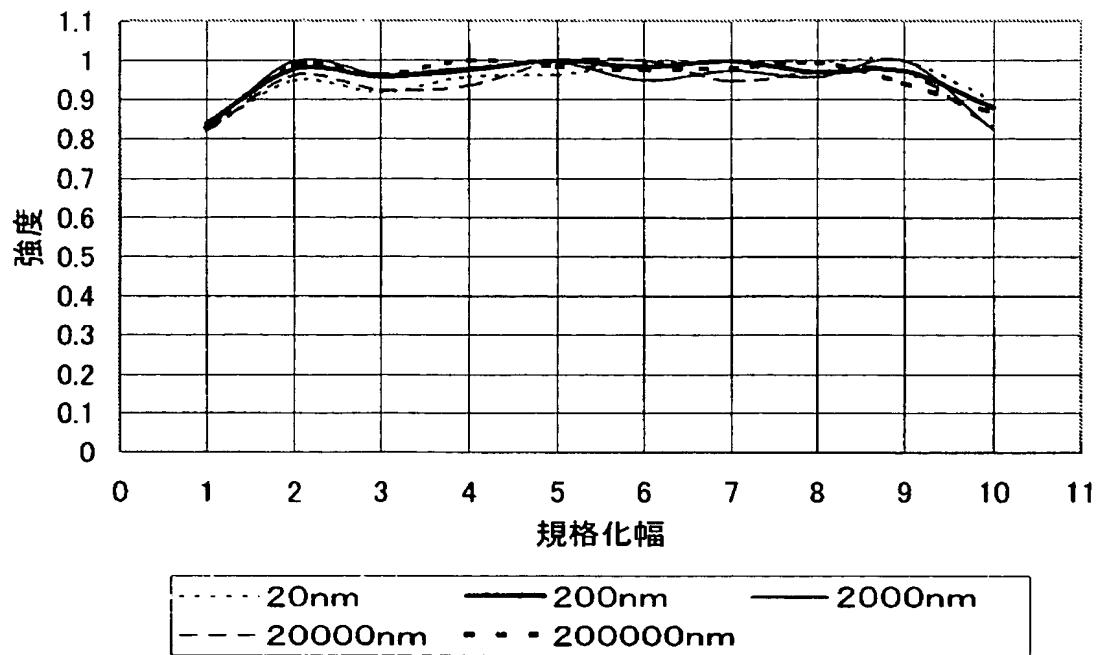


【図 8 c】



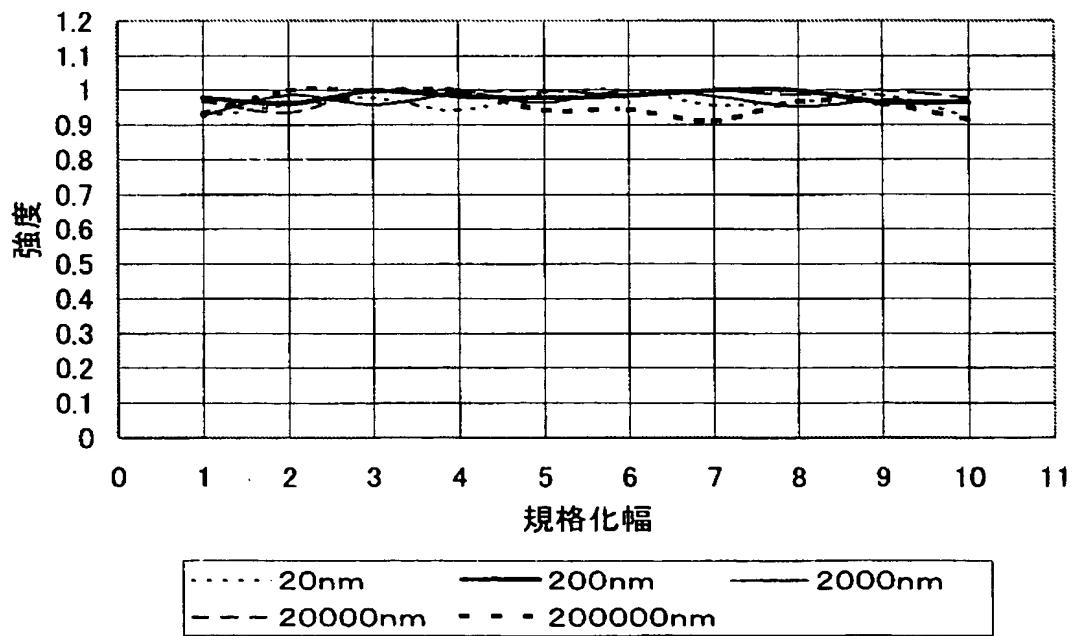
【図 9 a】

出射光強度分布(シート小サイズ)



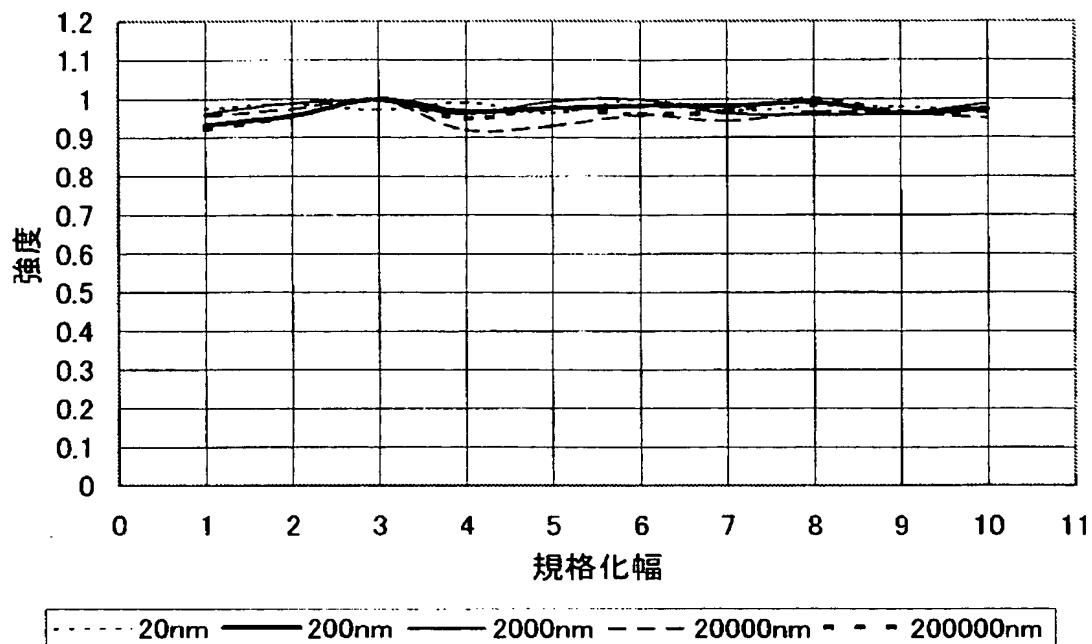
【図 9 b】

出射光強度分布(シート中サイズ)

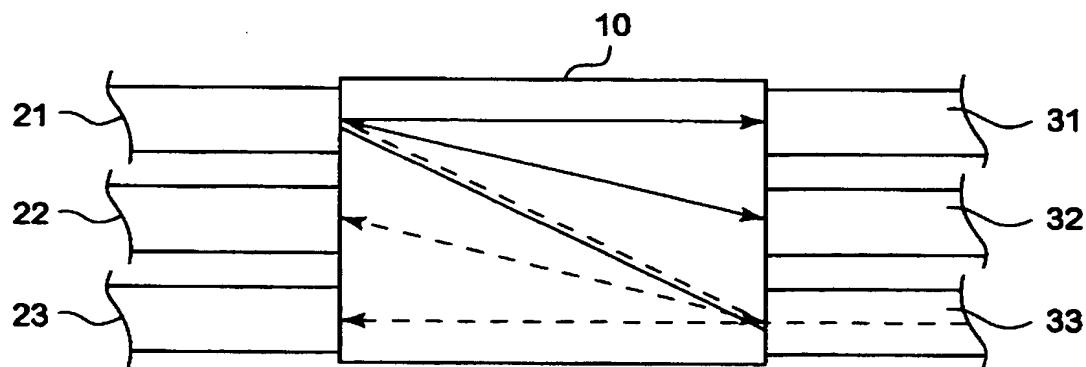


【図9c】

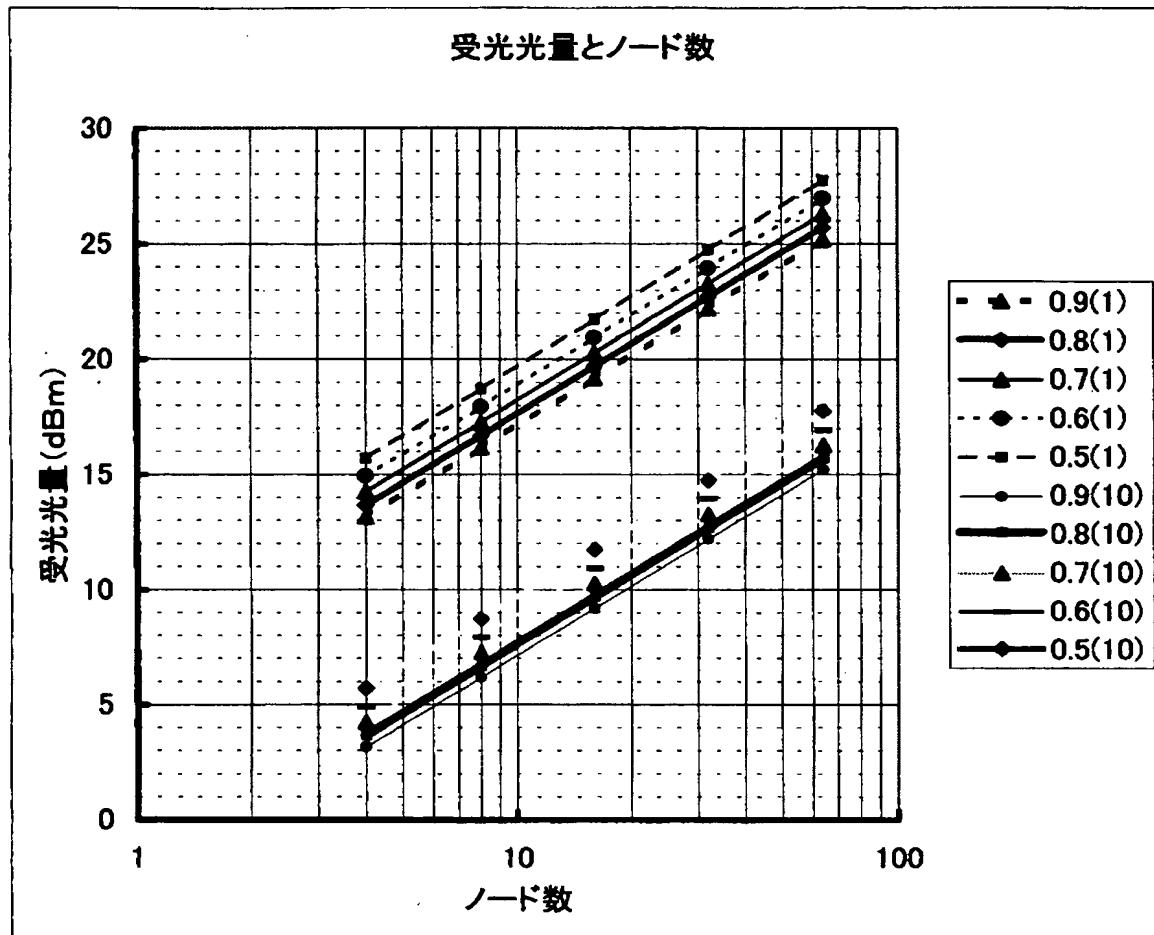
出射光強度分布(シート大サイズ)



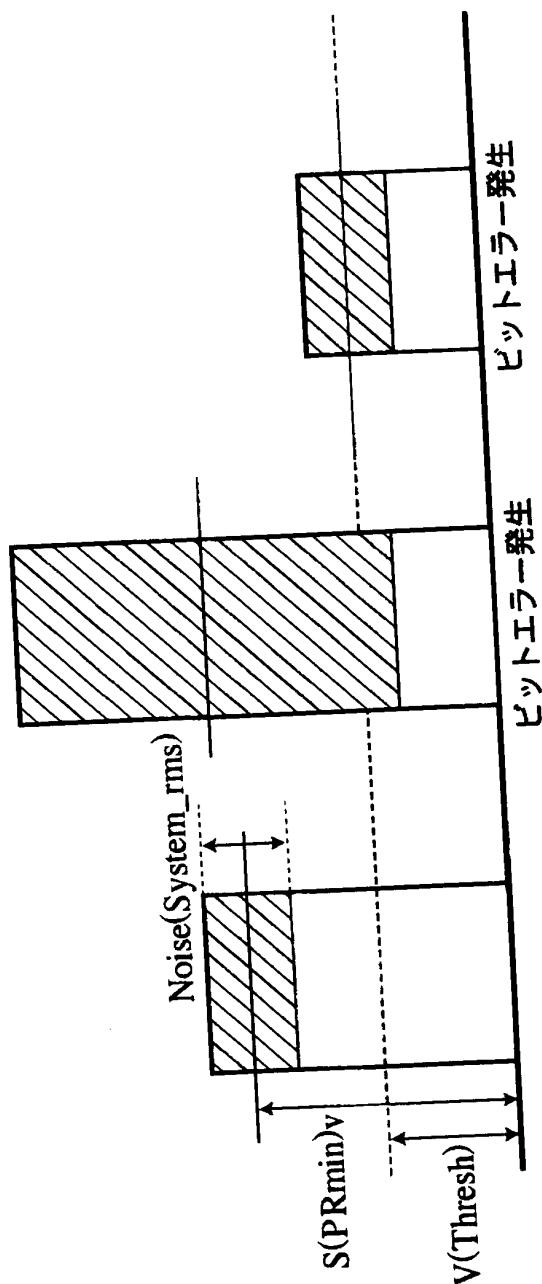
【図10】



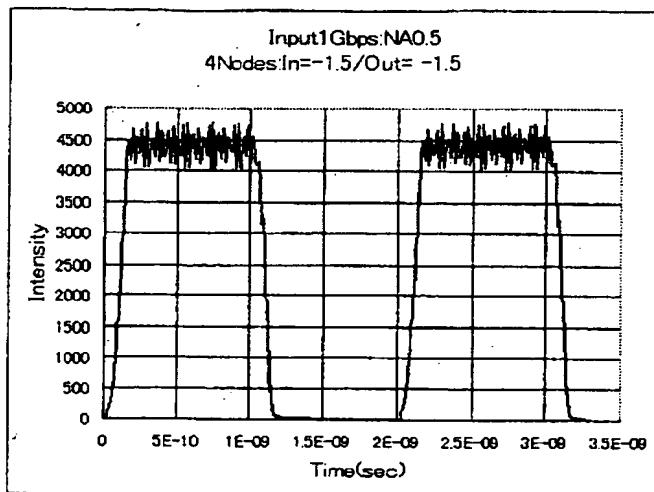
【図11】



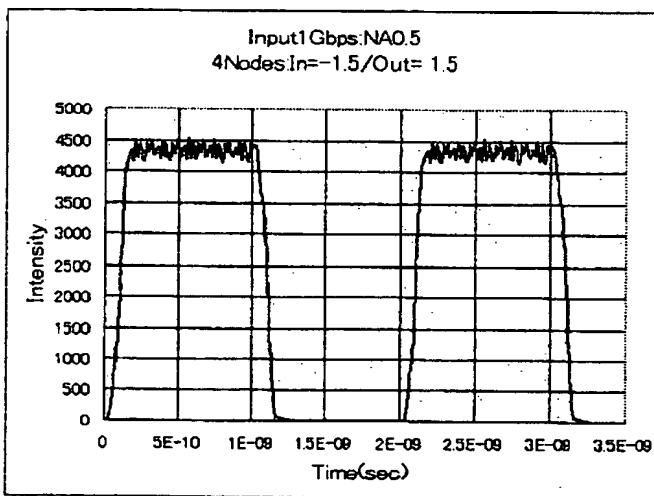
【図12】



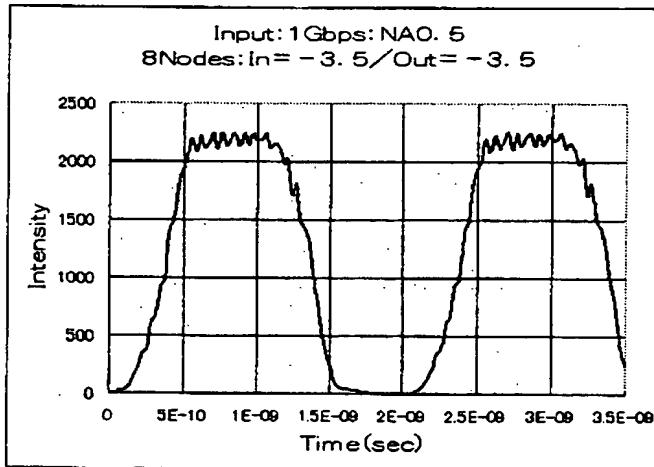
【図 1 3 a】



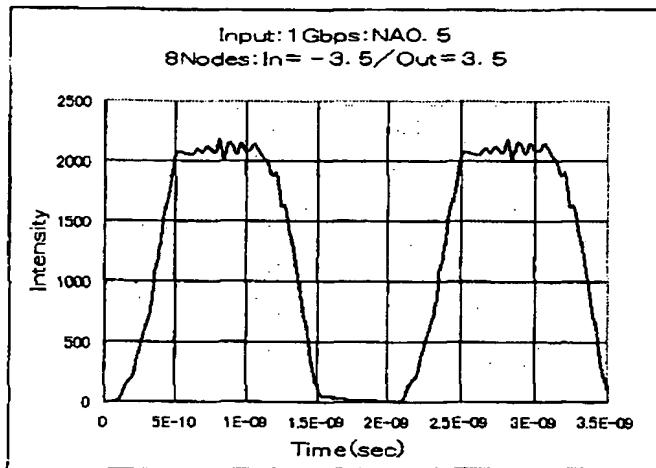
【図 1 3 b】



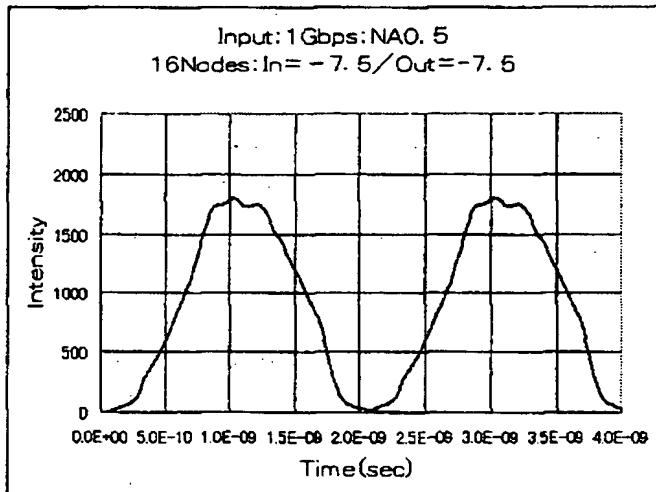
【図 1 4 a】



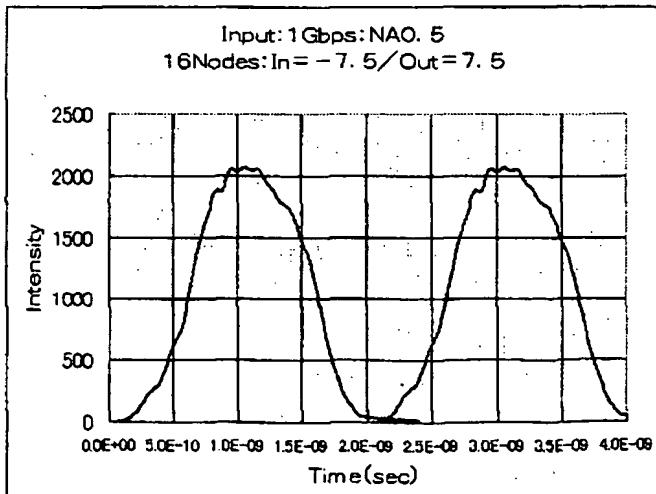
【図14b】



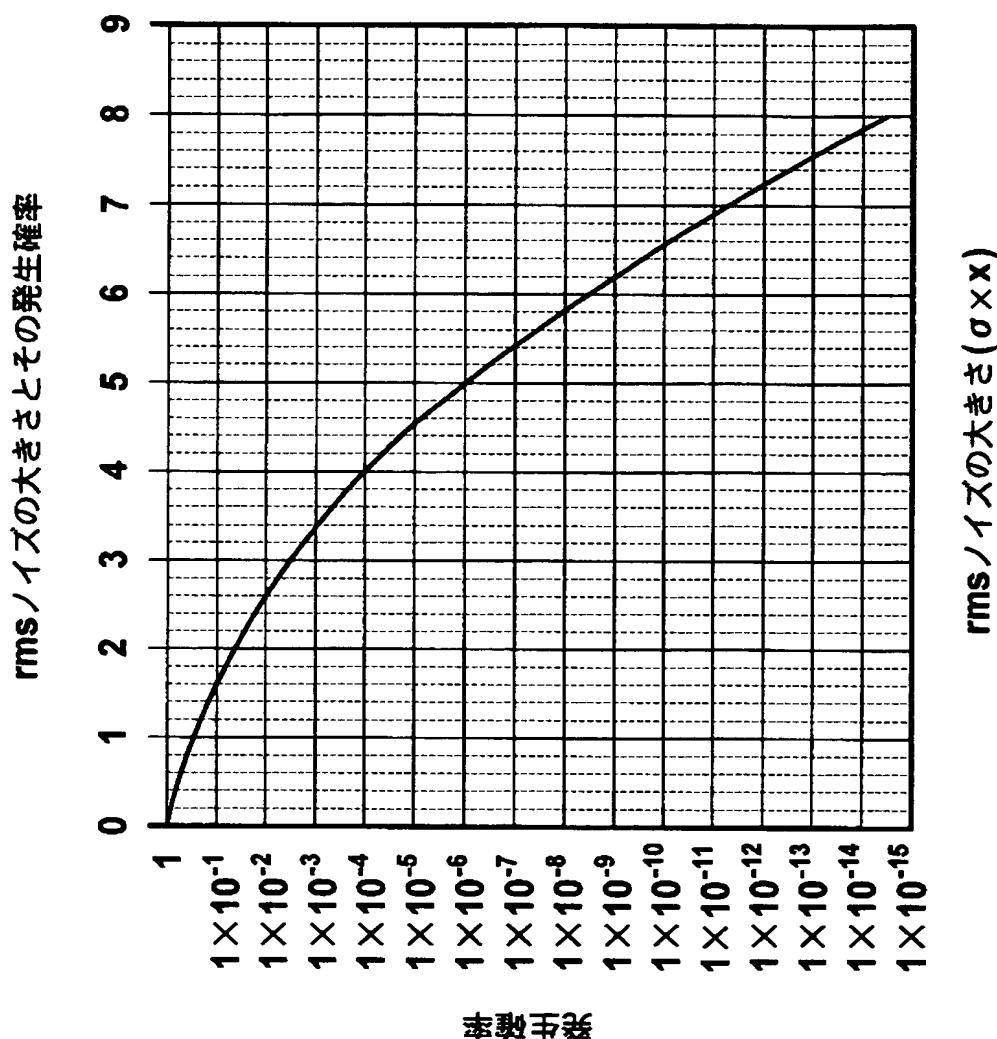
【図15a】



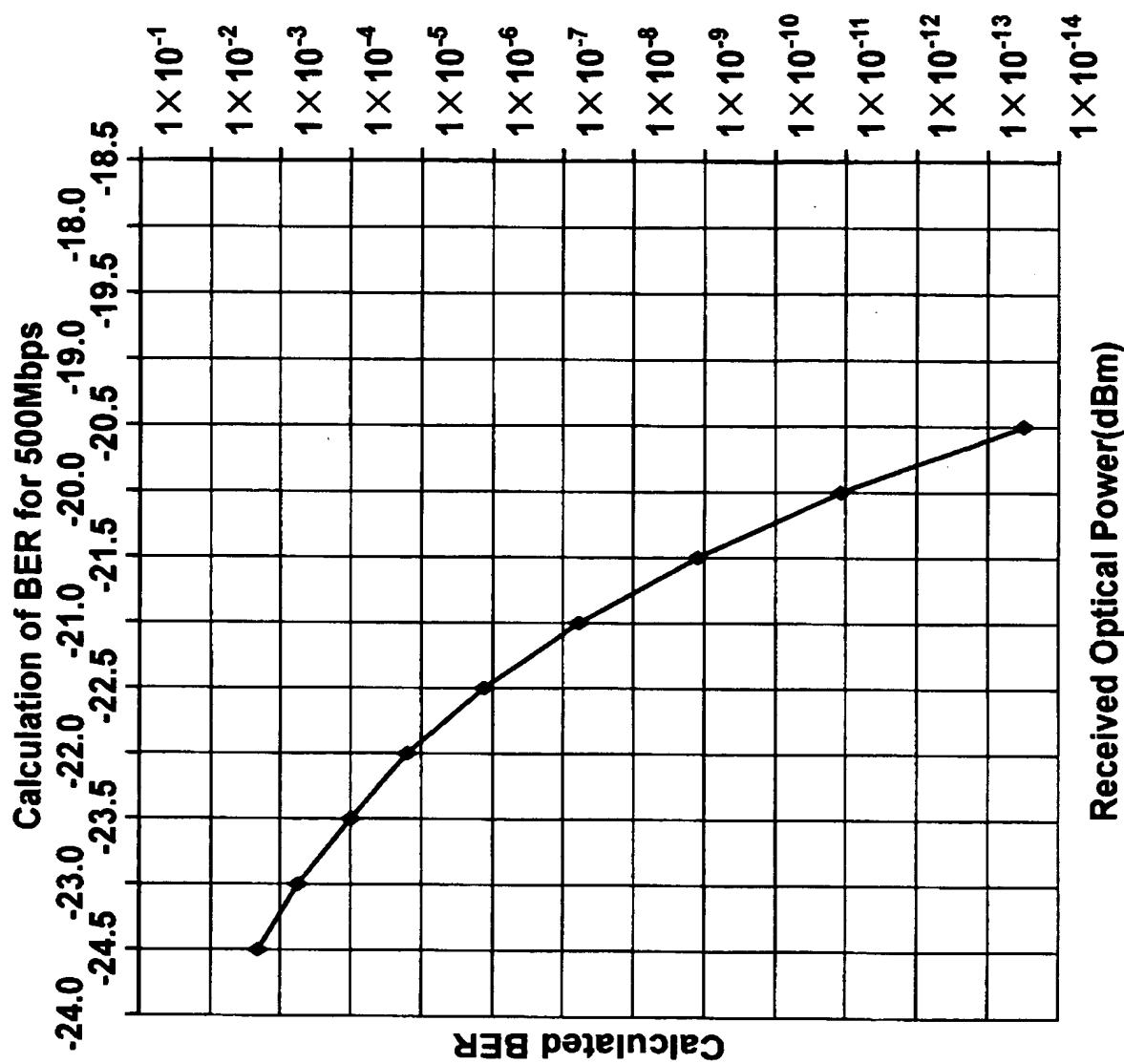
【図15b】



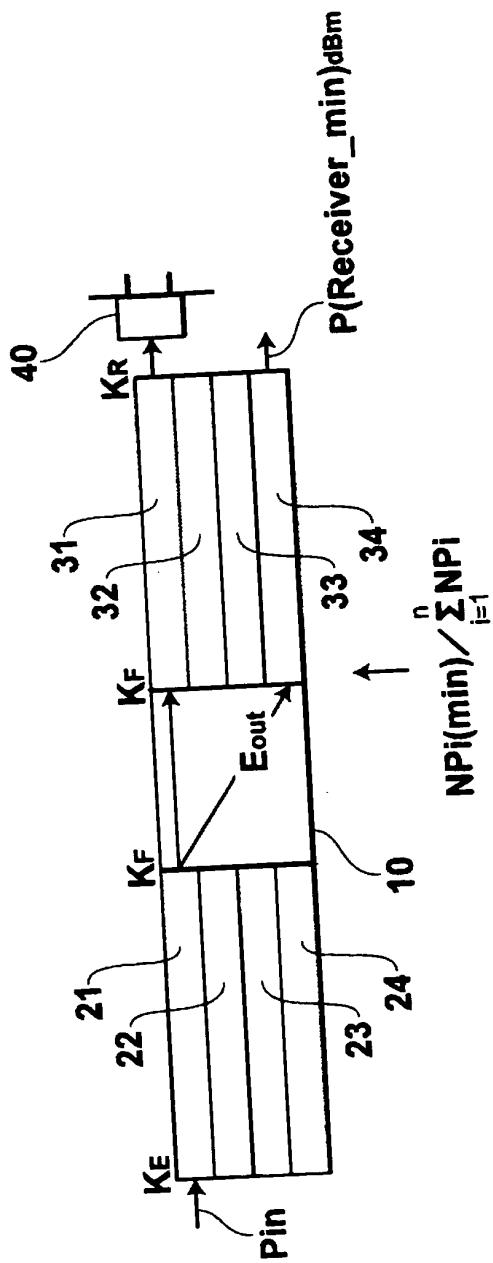
【図 16】



【図 17】



【図18】





【書類名】

要約書

【要約】

【課題】 シート状導光体において良好な光取り出し効率および、均一な出射光強度分布が得られ、また双方向通信も可能な通信システムを得る。

【解決手段】 シート状の光学媒質内に光を散乱させる粒子を含有してなり、一端面から入射した信号光を前記粒子により散乱させながら、受光器が結合された他端面側に伝搬させるシート状導光体10を用いた通信システムにおいて、前記粒子の散乱断面積を Φ 、前記光学媒質の光伝搬方向の長さを L_G 、粒子密度を N_p 、補正係数を K_C としたとき、 $\Phi \cdot N_p \cdot L_G \cdot K_C$ の値が0.9以下であるシート状導光体10を用いる。

【選択図】

図10

認定・付加情報

特許出願の番号 特願2003-018597
受付番号 50300131494
書類名 特許願
担当官 小松 清 1905
作成日 平成15年 2月 3日

<認定情報・付加情報>

【提出日】 平成15年 1月28日
【特許出願人】
【識別番号】 000005201
【住所又は居所】 神奈川県南足柄市中沼210番地
【氏名又は名称】 富士写真フィルム株式会社
【代理人】
【識別番号】 100073184
【住所又は居所】 神奈川県横浜市港北区新横浜3-18-3 新横浜K Sビル 7階
【氏名又は名称】 柳田 征史
【選任した代理人】
【識別番号】 100090468
【住所又は居所】 神奈川県横浜市港北区新横浜3-18-3 新横浜K Sビル 7階
【氏名又は名称】 佐久間 剛

次頁無

特願 2003-018597

出願人履歴情報

識別番号 [000005201]

1. 変更年月日 1990年 8月14日

[変更理由] 新規登録

住 所 神奈川県南足柄市中沼210番地
氏 名 富士写真フィルム株式会社